

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Análisis de circuitos con líneas de transmisión en el dominio
del tiempo**

**Estudiante: Sergio Sanz Sánchez
Tutor: Jorge Alfonso Ruiz Cruz**

Julio 2019

Resumen

Las líneas de transmisión están presentes en la mayoría de sistemas de telecomunicaciones dada la necesidad de transmitir información de un sistema a otro. Debido a eso, surge la necesidad del conocimiento de la propagación en estos medios de transmisión tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo, donde algunas características de las señales se aprecian mejor, como es el caso de las modulaciones digitales.

Los sistemas de telecomunicaciones dependen fuertemente de sus infraestructuras, por lo que son necesarias técnicas cada vez más desarrolladas para detectar y anticiparse a posibles fallos en el sistema. Una de las técnicas aplicadas hoy en día para la detección de discontinuidades en las líneas de transmisión es la reflectometría, que estudia las ondas reflejadas para analizar los posibles puntos de interés de las líneas de transmisión.

Este trabajo se centrará en el estudio de las líneas de transmisión en el dominio del tiempo con un enfoque también educativo. Para ello se harán simulaciones de diferentes tipos de circuitos con líneas de transmisión. A través de dichas simulaciones los estudiantes podrán comprender el comportamiento de las ondas ante diferentes situaciones y entender algunas de las posibles aplicaciones a través del análisis realizado.

En una primera parte se introducirán ciertos conceptos teóricos sobre las líneas de transmisión y sobre los tipos de ondas existentes. Se introducirán los conceptos necesarios para el desarrollo de dichos circuitos ante diferentes situaciones.

Como herramienta de simulación se usará Matlab, en la que se desarrollará cierto código hasta llegar a un software para la simulación de las ondas en cualquier punto del circuito. Dichas ondas se analizarán para poder observar los puntos de mayor interés en los medios de transmisión. Para la validación del software creado se utilizarán herramientas comerciales como LTSpice y ADS.

En una segunda parte se procederá las simulaciones de dichos circuitos los cuales irán aumentando en complejidad, variando el número de líneas de transmisión, así como el resto de elementos concentrados. También se simularán circuitos para diferentes tipos de señales que producirá el generador. El objetivo de esta segunda parte es poder analizar y comprender mediante diferentes simulaciones los diversos efectos de propagación y descubrir posibles aplicaciones del análisis de las líneas de transmisión en el tiempo.

Por último se analizarán las simulaciones desarrolladas para las diferentes distribuciones de elementos concentrados, para así poder destacar los puntos más positivos del análisis de las líneas de transmisión en el dominio del tiempo.

ABSTRACT

Transmission lines are present in most of the telecommunications systems because of the need to transmit information from one system to another. Due to this, there is a need to know the propagation in these transmission media both in the frequency domain and in the time domain, where some characteristics of the signals are better appreciated, as in the case of digital modulations.

Telecommunications systems depend heavily on their infrastructures, this is why more and more developed techniques are needed to detect and anticipate possible failures in the system. One of the techniques applied today for the detection of discontinuities in the transmission lines is the reflectometry, which studies the reflected waves to analyze the possible points of interest of the transmission lines.

This work will focus on the study of transmission lines in the domain of time with a focus on education. For this, simulations of different types of circuits with transmission lines will be made. Through these simulations students can understand the behavior of the waves in different situations and understand some of the possible applications through the analysis performed.

In the first part, certain theoretical concepts will be introduced on the transmission lines and on the types of waves that exist. The necessary concepts for the development of these circuits will be introduced in different situations.

As a simulation tool, Matlab will be used, in which a certain code will be developed up to a software for the simulation of the waves at any point of the circuit. These waves will be analyzed in order to observe the points of greatest interest in the transmission media. For the validation of the created software commercial tools like LTSpice and ADS will be used.

In a second part, the simulations of these circuits will continue, and will increase in complexity, varying the number of transmission lines, as well as the rest of the concentrated elements. Circuits will also be simulated for different types of signals that the generator will produce. The objective of this second part is to analyze and understand through different simulations the various effects of propagation and discover possible applications of the analysis of transmission lines over time.

Finally, the simulations developed for the different distributions of concentrated elements will be analyzed, in order to highlight the most positive points in the analysis of transmission lines in the time domain.

Palabras clave

Línea de transmisión, onda incidente, onda reflejada, impedancia, real imaginaria, forma de onda, sección, simulación, resultados, amplitud, tiempo, serie, paralelo, sistemas de comunicaciones, alta frecuencia, microondas, modulación digital.

Keywords

Transmission line, incident wave, reflected wave, impedance, real imaginary, waveform, section, simulation, results, amplitude, time, series, parallel, communication systems, high frequency, microwave, digital modulation.

Agradecimientos

Después de unos cuantos años me dispongo a dedicar unas líneas al trabajo más esperado de la carrera.

En primer lugar, quería agradecer a mi tutor Jorge Alfonso Ruiz Cruz por darme la oportunidad y la confianza para llevar a cabo este trabajo. También le quería dar las gracias por el tiempo y la paciencia invertida a lo largo de este año.

Por otra parte, quería dar las gracias a mis compañeros los cuales me han ayudado y me han hecho más llevadera esta larga carrera. Por todas las anécdotas vividas y por su apoyo incondicional quería dedicarles estas palabras de agradecimiento en especial a Jorgito y a Lolo. Pero por supuesto a todos los demás de este grupo que hemos creado: Guille, Pablo, Diego, Jamil y los luchadores que siguen estudiando en el máster.

Por último, quería dedicar parte de este trabajo a la parte más importante de mi vida, mis padres y mi hermano. Quería agradecerles, entre muchas otras cosas, el apoyo incondicional que he recibido durante toda la carrera, estando a mi lado en los momentos fáciles y difíciles de ella. Simplemente daros las gracias por estar en mi vida.

Este éxito en verdad, os pertenece mucho más a vosotros que a mí. Gracias!

Índice de contenidos

1.	Introducción.....	12
1.1.	Motivación.....	12
1.2.	Objetivos.....	12
1.3.	Organización de la memoria.....	13
2.	Estudio del estado del arte.....	14
2.1.	Principios teóricos.....	14
3.	Simulación de circuitos con una línea de transmisión.....	16
3.1.	Simulación modificando la impedancia de carga.....	17
3.1.1.	Simulación con impedancia real.....	17
3.1.2.	Simulación con impedancia imaginaria.....	21
3.2.	Simulación modificando la señal del generador.....	25
3.2.1.	Simulación con señal periódica.....	26
3.2.2.	Modulación ASK.....	28
4.	Simulación de circuitos con dos líneas de transmisión.....	32
4.1.	Modificando la impedancia característica de las líneas de transmisión.....	36
4.2.	Modificando el número de impedancias del circuito.....	40
5.	Circuitos con tres líneas de transmisión.....	45
6.	Conclusiones y trabajo futuro.....	51
6.1.	Conclusiones.....	51
6.2.	Trabajo futuro.....	51
7.	Referencias.....	52

Índice de Figuras

<i>Ilustración 1. Circuito con una línea de transmisión.....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 2. Señal escalón unitario de 0 a 1 segundos.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 3. Señal escalón unitario de -0.5 a 0.5 segundos.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4. Transformada de Fourier de la señal escalón unitario.....</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 5. Simulación de un escalón en el dominio del tiempo [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 6. Onda incidente en $z=0$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 7. Onda incidente en $z=d/2$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 8. Onda incidente en $z=d$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 9. Onda reflejada en $z=d$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 10. Onda reflejada en $z=0$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 11. Onda total en $z=d$ para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 12. Circuito LTSpice para un escalón e impedancia real.....</i>	<i>21</i>
<i>Ilustración 13. Onda incidente y reflejada en $z=d$ con impedancia imaginaria [1].....</i>	<i>22</i>
<i>Ilustración 14. Onda incidente en $z=0$ con impedancia imaginaria.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 15. Onda reflejada en $z=0$ con impedancia imaginaria.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 16. Onda incidente en $z=d$ con impedancia imaginaria.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 17. Onda reflejada en $z=d$ con impedancia imaginaria.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 18. Onda total en $z=d$ con impedancia imaginaria.....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 19. Circuito LTSpice para un escalón e impedancia imaginaria.....</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 20. Señal del generador $\sin(\pi t)$.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 21. Onda incidente en $z=0$ con señal periódica.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 22. Onda incidente en $z=d$ con señal periódica.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 23. Onda reflejada en $z=d$ con señal periódica.....</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 24. Onda total en $z=d$ con señal periódica.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 25. Modulación ASK [9].....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 26. Señal portadora en modulación ASK.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 27. Onda incidente en ($z=0$) en modulación ASK.....</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 28. Onda reflejada en ($z=0$) en modulación ASK.....</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 29. Onda incidente en ($z=d$) en modulación ASK.....</i>	<i>30</i>

<i>Ilustración 30. Onda reflejada en ($z=d$) en modulación ASK.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 31. Onda total en ($z=d$) en modulación ASK.....</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 32. Circuito con dos líneas de transmisión en serie.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 33. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 34. Onda incidente en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 35. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 36. Onda total en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 37. Onda incidente en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 38. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 39. Onda total en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 40. Circuito LTSpice de 2 líneas de transmisión.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 41. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 42. Onda incidente en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 43. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 44. Onda total en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 45. Onda incidente en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 46. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 47. Onda total en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 48. Circuito transformador $\lambda/4$.....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 49. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 50. Onda incidente en $z=d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 51. Onda reflejada en $z=d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 52. Onda total en $z=d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 53. Onda incidente en $z=d_2$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 54. Onda reflejada en $z=d_2$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 55. Onda incidente en $z=2d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 56. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 57. Onda total en $z=2d$. Circuito $\lambda/4$.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 58. Circuito con 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 59. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 60. Onda incidente en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 61. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>47</i>

<i>Ilustración 62. Onda total en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 63. Onda incidente en $z=d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 64. Onda reflejada en $z=d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 65. Onda incidente en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 66. Onda reflejada en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>49</i>
<i>Ilustración 67. Onda total en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 68. Circuito LTSpice 3 líneas de transmisión.....</i>	<i>50</i>

1. Introducción

1.1. Motivación

En la inmensa mayoría de equipos y sistemas de telecomunicaciones, dada la necesidad de transmitir información de un punto a otro se encuentran presentes líneas de transmisión. Debido a la importancia de la correcta transmisión de información adquiere gran importancia el conocimiento de los efectos de propagación en el dominio de la frecuencia, pero también tiene gran importancia el conocimiento de dichos efectos en el dominio del tiempo como es el caso de las modulaciones digitales.

Los equipos de redes y sistemas de telecomunicaciones son mayoritariamente dependientes de las infraestructuras por las cuales se mantienen. Debido al uso de sistemas y tecnologías más punteras estos sistemas necesitan procesos de revisión y mantenimiento más exhaustivos y sofisticados a la hora de instalar cualquier sistema de transmisión, dado que un pequeño fallo podría significar unos costes elevados en un futuro.

Una de las técnicas utilizadas hoy en día para abordar estos procesos son las pruebas de reflectometría, aplicadas por ejemplo en fibras ópticas. La reflectometría es una técnica utilizada en telecomunicaciones para analizar ciertas líneas de transmisión mediante la inyección de una señal con características específicas que se propaga mediante las leyes de propagación del medio indicado y cuando se encuentre una discontinuidad, parte de dicha energía se refleja al punto de inyección. Las ondas reflejadas nos indicarán los puntos de interés de dicha línea de transmisión. Si no existe dicha onda reflejada indicará que dicha línea no tiene discontinuidad alguna o acaba en una impedancia resistiva de igual valor a su impedancia característica.

Algunas áreas de aplicación de la reflectometría en el dominio del tiempo son por ejemplo la medición de humedad de los suelos, la caracterización de los estratos de la corteza terrestre, medidas aéreas, detección de fallos en cables y la fibra óptica. Destacando entre todos estos por el enfoque de este trabajo, la detección de fallos en cables y fibra óptica.

Uno de los objetivos principales de este trabajo es poder aplicar su estudio en el ámbito de la educación. Mediante los estudios y desarrollos realizados en este trabajo los estudiantes podrán analizar y comprender los efectos de propagación en las líneas de transmisión para unas determinadas características en el dominio del tiempo. Por otro lado, los estudiantes podrán realizar multitud de simulaciones para distintos circuitos y con diferentes elementos concentrados a través del software creado, por tanto podrán analizar con facilidad las diferencias entre los efectos de propagación para las distintas situaciones.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el desarrollo de un software de análisis de las líneas de transmisión en el dominio del tiempo para distintos tipos de situaciones. Los objetivos más detallados son los siguientes:

1. Elaborar una herramienta de simulación que nos permita visualizar el comportamiento de las ondas en cualquier punto de las líneas de transmisión del circuito. Esta herramienta se validará mediante otras herramientas comerciales tales como LTSpice y ADS.

2. Simulación de diferentes tipos de circuitos, variando el tipo de señal, el número de elementos concentrados o el tipo de elementos, para así ir analizando circuitos con una mayor complejidad.
3. Entender el comportamiento de las ondas en el dominio del tiempo para así entender los beneficios del análisis de las líneas de transmisión en el dominio del tiempo.

1.3. Organización de la memoria

La memoria constará de los siguientes capítulos:

- El capítulo 2 contendrá aspectos teóricos necesarios para la elaboración de este trabajo. Se centrará en los aspectos teóricos relativos a líneas de transmisión así como a las ondas producidas en ellas. También se hará una pequeña demostración sobre la transformada de Fourier teórica necesaria para los posteriores cálculos de los distintos circuitos.
- El capítulo 3 contendrá simulaciones de circuitos con una línea de transmisión para distintos tipos de señales (periódicas y no periódicas), para distintos elementos concentrados (impedancias reales e imaginarias).
- El capítulo 4 contendrá simulaciones de circuitos con dos líneas de transmisión, para circuitos con un mayor número de elementos concentrados o variando la impedancia característica de las líneas. Así como la simulación de un circuito con adaptadores en un cuarto de longitud de onda.
- El capítulo 5 contendrá una simulación de un circuito con tres líneas de transmisión con diferente disposición de las líneas entre sí (serie o paralelo).
- El capítulo 6 contendrá las conclusiones del trabajo haciendo comparativas entre los diferentes resultados así como destacando los puntos positivos del análisis de dichas líneas en el dominio del tiempo.

2. Estudio del estado del arte

En este trabajo se realizarán simulaciones de diferentes tipos de sistemas mediante el software creado a través de Matlab. Para la verificación de dicho software en las distintas distribuciones se ha utilizado LTSpice y para alguno de los casos ADS. Para la realización de dichas simulaciones se ha seguido un procedimiento basado en las fuentes bibliográficas citadas más adelante pero en especial se ha seguido la información de [1].

Se realizarán simulaciones propias como las aplicadas en procesos de prevención de fallos en los sistemas de telecomunicaciones como la reflectometría, la cual analiza las ondas reflejadas para la detección de los posibles puntos de interés de las líneas de transmisión.

2.1 Principios teóricos

El circuito más sencillo para la explicación de las simulaciones futuras es el representado en la ilustración 1.

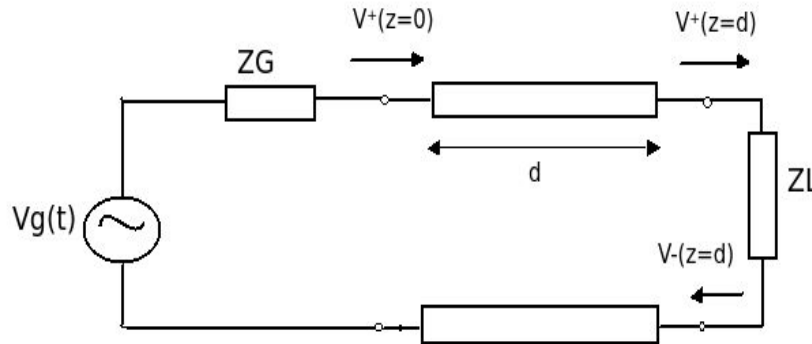


Ilustración 1. Circuito con una línea de transmisión

Suponiendo que las líneas de transmisión en todas las simulaciones que se van a mostrar más adelante no son ideales, la constante de propagación queda de la siguiente manera:

$$\gamma(f) = \sqrt{-w^2 \mu \epsilon}$$

Las tensiones y corrientes en cada punto z de la línea de transmisión de impedancia Z_o son los siguientes:

$$V(z, f) = V_o^+ e^{-\gamma d} + V_o^- e^{-\gamma d}$$

$$I(z, f) = \frac{V_o^+}{Z_o} e^{-\gamma d} - \frac{V_o^-}{Z_o} e^{-\gamma d}$$

Con las expresiones anteriores podemos deducir la expresión de la impedancia vista en cualquier punto de la línea de transmisión:

$$Z(z, f) = \frac{V(z, f)}{I(z, f)} = \frac{\frac{V_o^+}{Z_o} e^{-\gamma d} + \frac{V_o^-}{Z_o} e^{-\gamma d}}{\frac{V_o^+}{Z_o} e^{-\gamma d} - \frac{V_o^-}{Z_o} e^{-\gamma d}} = Z_o \frac{Z_L \cosh(\gamma d) + Z_o \sinh(\gamma d)}{Z_o \cosh(\gamma d) + Z_L \sinh(\gamma d)}$$

El coeficiente de reflexión producido en la discontinuidad resulta del cociente de la onda de tensión reflejada y la onda de tensión incidente:

$$\Gamma(z,f) = \frac{V_o^-(z,f)}{V_o^+(z,f)} = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$$

Mediante todos los parámetros que se acaban de definir se pueden resolver los circuitos que se verán más adelante y así proceder a su simulación para analizar el comportamiento de dichas ondas en el dominio del tiempo.

Todos los parámetros anteriores se van a calcular en el dominio de la frecuencia, para ello se va a hacer uso de la transformada de Fourier. Para verificar la transformada de Fourier realizada en Matlab se ha comparado dicha transformada con la que se ha calculado teóricamente. La comparación se ha realizado con la transformada de una señal escalón unitario de un segundo, representado en la ilustración 2.

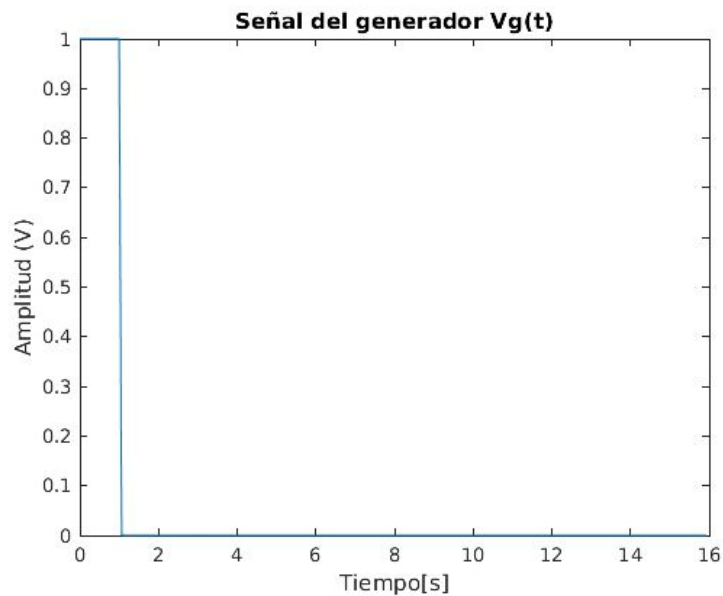


Ilustración 2. Señal escalón unitario de 0 a 1 segundos

Para el cálculo teórico de esta validación inicial, se ha partido de una señal escalón unitario de $-T/2$ a $T/2$ que tiene la forma de la ilustración 3:

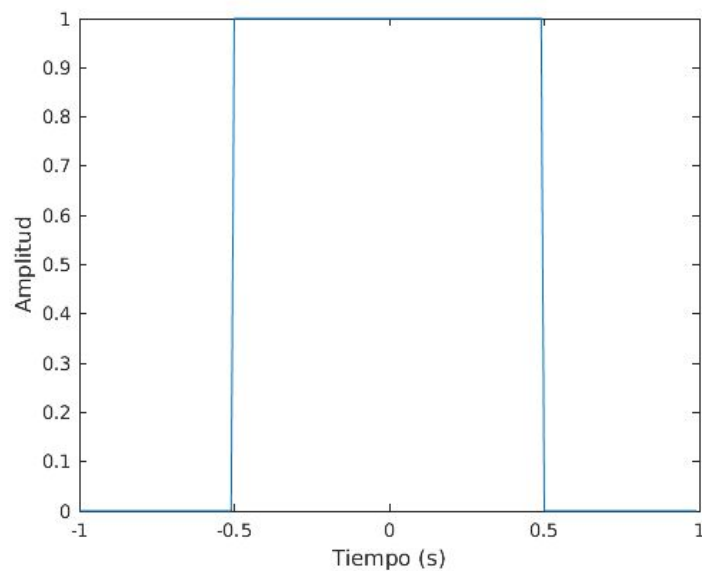


Ilustración 3. Señal escalón unitario de -0.5 a 0.5 segundos

En este caso $T=1$ y su transformada teórica queda la siguiente forma:

$$F \left[\Pi \left(\frac{t}{T} \right) \right] = \int_{-\infty}^{\infty} \Pi \left(\frac{t}{T} \right) e^{-j\omega t} dt = \int_{-T/2}^{T/2} 1 \cdot e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{-j\omega} (e^{-j\omega T/2} - e^{j\omega T/2}) = \frac{2}{j\omega} (e^{j\omega T/2} - e^{-j\omega T/2})$$

$$F \left[\Pi \left(\frac{t}{T} \right) \right] = 2 \frac{\sin(\omega T/2)}{\omega} = T \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} = T \text{sinc}(Tf)$$

Aplicando la propiedad de desplazamiento de la transformada de Fourier.

$$F [f(t - t_o)] = F(\omega) e^{-j\omega t_o}$$

Obteniendo así la transformada teórica de nuestra señal del generador.

$$F [v_G(t)] = T \text{sinc}(Tf) e^{-j\omega t_o}$$

Siendo en este caso $t_o=0.5$. Se han obtenido los siguientes resultados en la comprobación de la transformada en la simulación, representados en la ilustración 4.

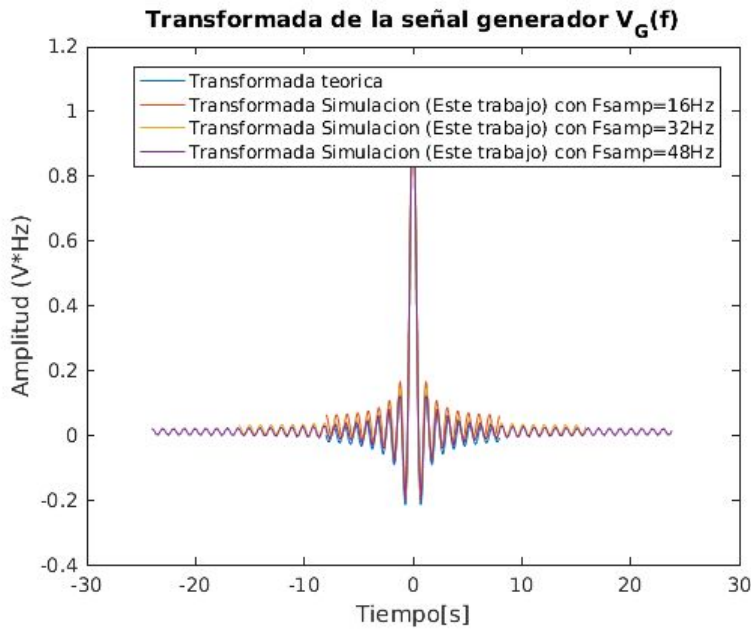


Ilustración 4. Transformada de Fourier de la señal escalón unitario

Se puede observar que cuando la frecuencia de sampleo adquiere un valor más elevado, es decir, cuantas más muestras se obtienen, la transformada resultante es más similar a la calculada teóricamente.

3. Simulación de circuitos con una línea de transmisión

En esta simulación se va a proceder a calcular completamente el circuito de la ilustración 1. mediante los parámetros ya definidos anteriormente. Para esta simulación y todas las futuras simulaciones se simulará en unidades de tiempos y longitudes normalizadas para una correcta visualización de las formas de onda. Para una simulación con unidades reales se debería desnormalizar adecuando la señal de origen y demás parámetros del circuito.

En primer lugar se ha calculado la onda incidente al comienzo de la línea de transmisión, es decir en $z=0$. Esta onda ya ha sido definida anteriormente como V_o^+ .

Mediante el parámetro ya definido de la impedancia vista en cualquier punto de la línea podemos simplificar el circuito para así calcular la expresión que adquiere la onda que queremos resolver. Si a dicha impedancia la llamamos Z_{in} podemos obtener las dos ecuaciones siguientes (para todas las ecuaciones se indicará al comienzo de ellas la dependencia, aunque en su desarrollo no se indique) :

$$V_o^+(z=0, f) + V_o^-(z=0, f) = V_o^+ \cdot (1 + \Gamma_{in})$$

Si juntamos ambas ecuaciones nos queda la siguiente expresión para dicha onda:

$$V_o^+(z=0, f) = \frac{V_G \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_G}}{1 + \Gamma_{in}}$$

Mediante la onda anterior y con la expresión de la tensión en cualquier punto de la línea podemos obtener la onda incidente al final de ésta, quedando la siguiente expresión:

$$V_o^+(z=d, f) = V_o^+ \cdot e^{-\gamma d}$$

A través de la onda anterior podemos calcular la onda reflejada al final de la línea de transmisión mediante la definición de onda reflejada y a su vez de manera análoga a la onda incidente al final de la línea podemos calcular la onda reflejada al comienzo de ella.

$$V_o^-(z=d, f) = V_o^+ \cdot \Gamma_L$$

$$V_o^-(z=0, f) = V_o^- \cdot e^{-\gamma d}$$

Con estas expresiones ya quedaría resuelto el circuito, teniendo la expresión de las ondas incidentes y reflejadas en cualquier punto de la línea. Mediante la suma de las ondas incidentes y reflejadas al comienzo y al final de la línea respectivamente podemos obtener la onda total en dichos puntos. Quedando así la expresión de la onda total al final de la línea de transmisión:

$$V_L(z=d, f) = V_o^+(z=d, f) + V_o^-(z=d, f)$$

3.1. Simulación modificando la impedancia de carga

En este apartado se ha simulado el circuito de la ilustración 1 para dos tipos diferentes de carga, tanto reales como imaginarias. Para todas las simulaciones de este apartado se ha elegido como señal del generador la señal de la ilustración 2.

3.1.1. Simulación con impedancia real

Este apartado está basado en la información sacada de [1], en el que se ha elegido como impedancia característica de la línea $Z_o=50\Omega$, como longitud de la línea $d=3 \cdot 10^8 m$. Un aspecto que solamente puede ser teórico ya que la longitud de una línea de transmisión no puede tener una longitud tan grande, sino que en la realidad sería en mm. Por tanto, se han cogido estos valores para trabajar con unidades del sistema internacional para que tengan efectos de propagación observables, pero dichos resultados son escalables a otras bandas de frecuencia. Para la impedancia del generador se ha elegido una impedancia de valor $Z_G = \frac{Z_o}{3}$, mientras que para la impedancia de carga se ha elegido una impedancia de valor $Z_L = 3Z_o$, obteniendo así una relación entre los coeficientes de reflexión de carga y del generador de la siguiente forma: $\Gamma_L = -\Gamma_G$. Según la información obtenida en [1] a medida que las ondas se van propagando en el tiempo sufrirán un desplazamiento en el tiempo y como el coeficiente de reflexión del generador es negativo la ondas obtendrán un cambio de signo con la atenuación correspondiente como se puede ver en la ilustración 5:

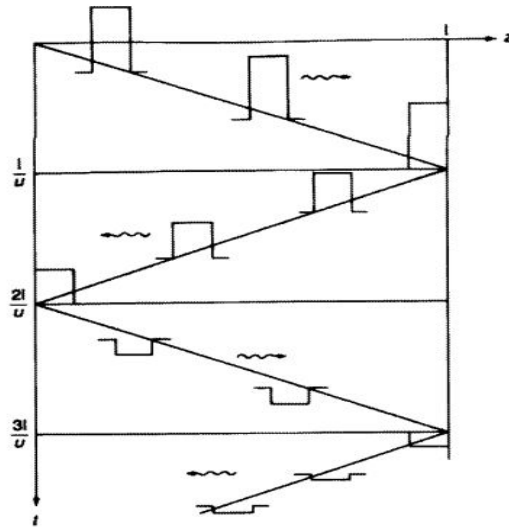


Ilustración 5. Simulación de un escalón en el dominio del tiempo [1]

Mediante la simulación de nuestra herramienta hemos obtenido los siguientes resultados:

Onda incidente al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 6:

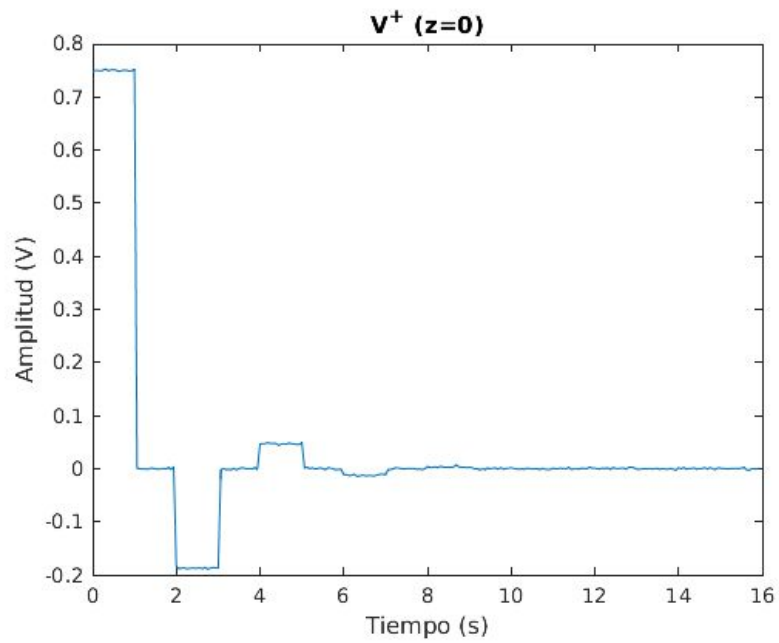


Ilustración 6. Onda incidente en $z=0$ para un escalón e impedancia real

Onda incidente a la mitad de la línea de transmisión, representada en la ilustración 7:

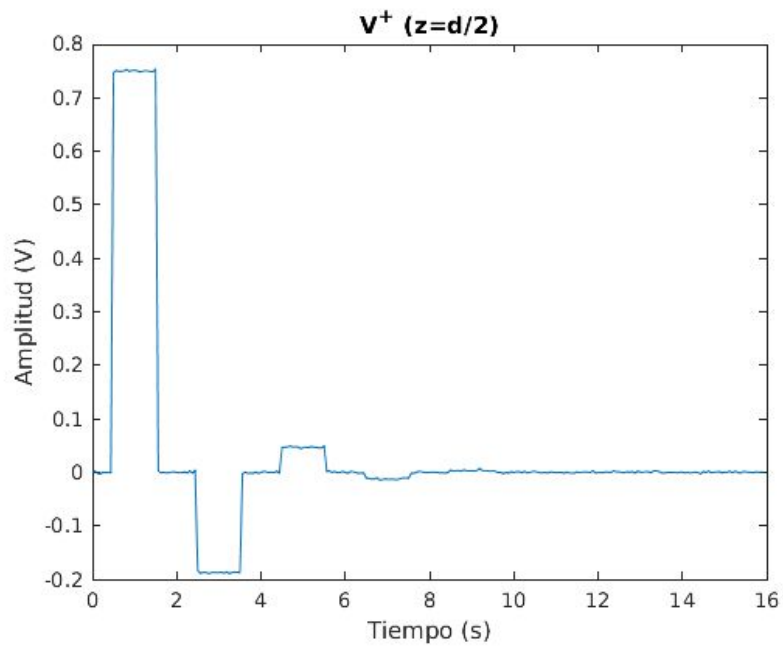


Ilustración 7. Onda incidente en $z=d/2$ para un escalón e impedancia real

Onda incidente al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 8:

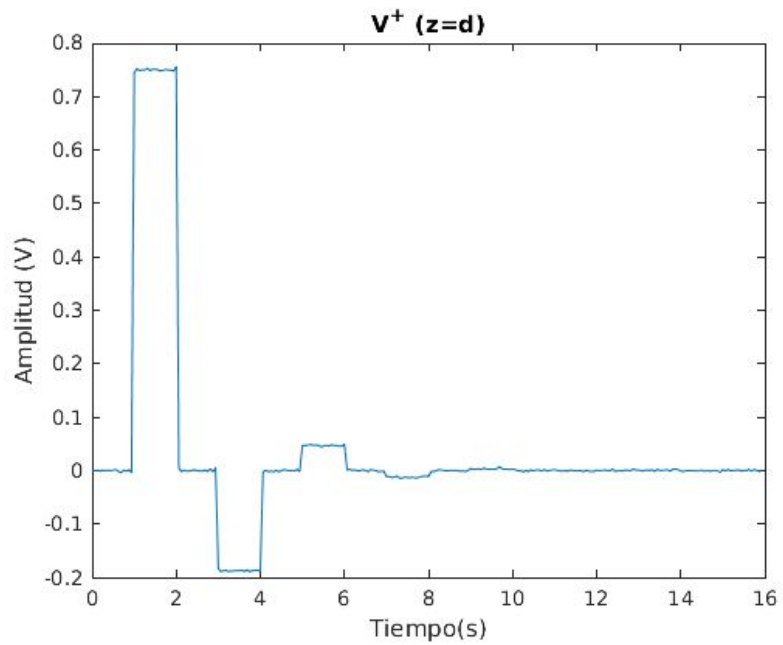


Ilustración 8. Onda incidente en $z=d$ para un escalón e impedancia real

Onda reflejada al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 9:

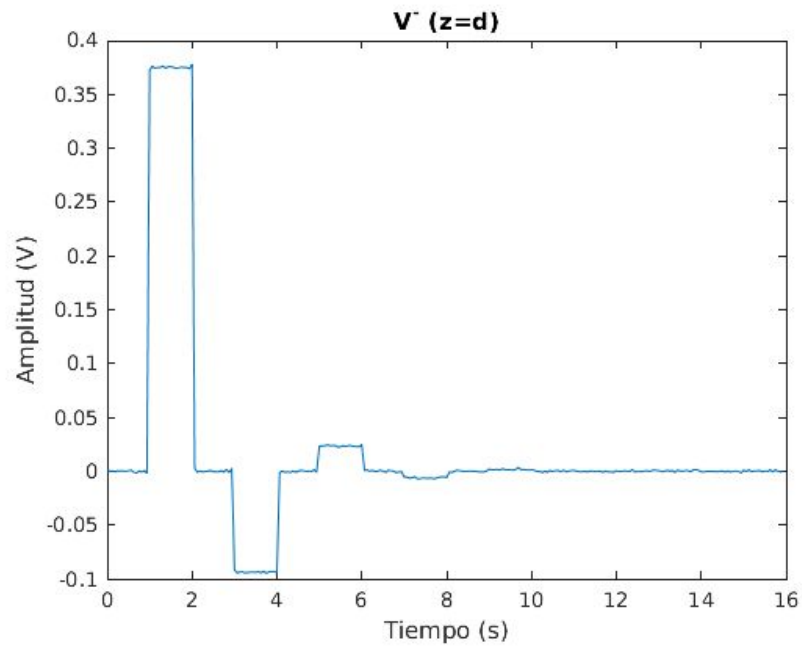


Ilustración 9. Onda reflejada en $z=d$ para un escalón e impedancia real

Onda reflejada al inicio de la línea, representada en la ilustración 10:

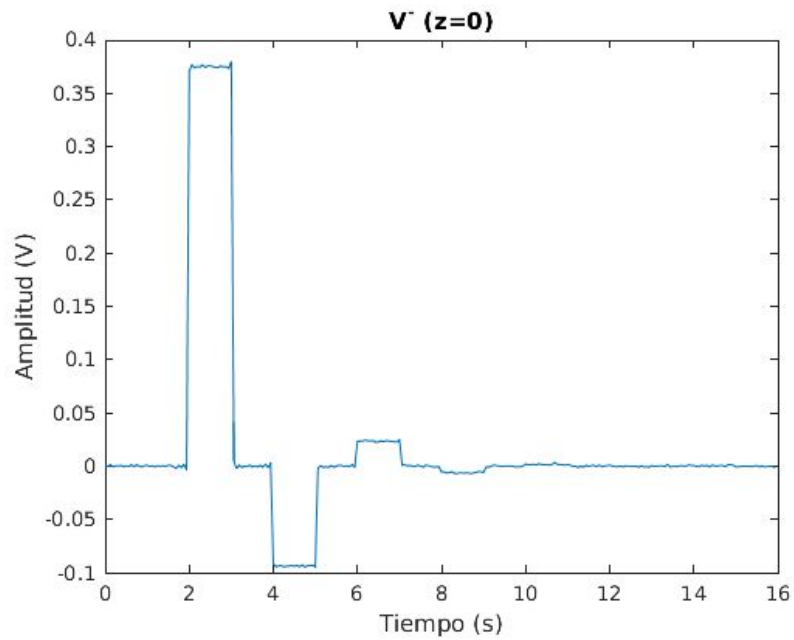


Ilustración 10. Onda reflejada en $z=0$ para un escalón e impedancia real

Onda total al final de la línea, representada en la ilustración 11:

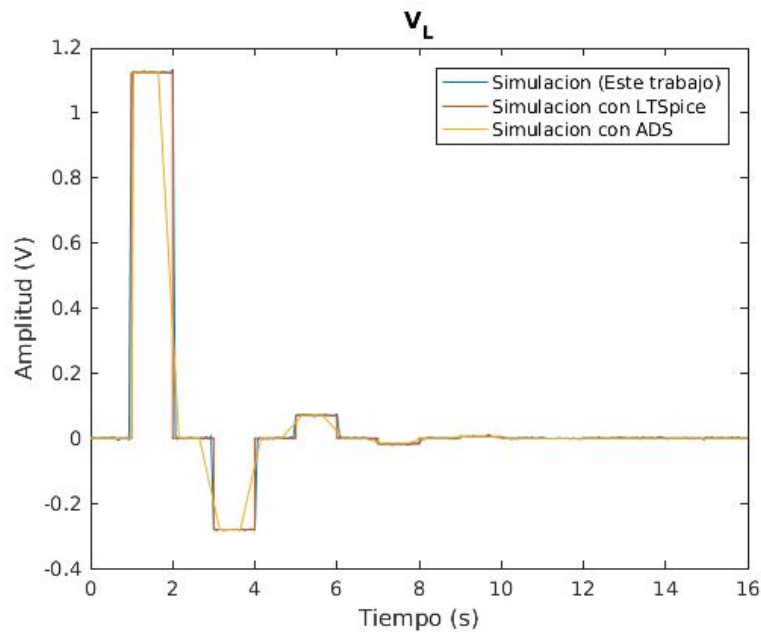


Ilustración 11. Onda total en $z=d$ para un escalón e impedancia real

Como se puede apreciar la onda tarda en propagarse de un extremo al otro de la línea de transmisión 1s. Esto se debe a que la velocidad de la luz tiene la misma magnitud que la longitud de la línea.

También se puede apreciar que aparece un pequeño rizado, que es conocido como el fenómeno de Gibbs en el que es común que en un escalón aparezcan dos picos a los extremos superiores de este a los demás producidos por el rizado.

Para la validación de la herramienta se han utilizado los programas de LTSpice y ADS, en el que se han introducido las mismas variables que se han utilizado para la simulación del circuito con la herramienta creada. En este caso se puede comprobar que los resultados son los mismos. El circuito de LTSpice, representada en la ilustración 12 es el siguiente:

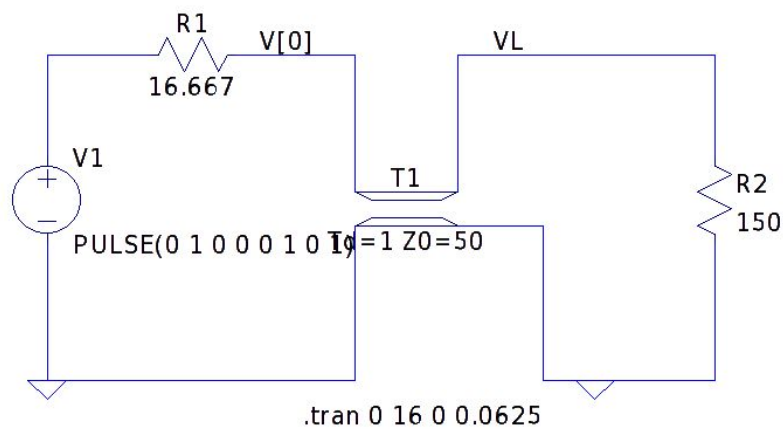


Ilustración 12. Circuito LTSpice para un escalón e impedancia real

3.1.2 Simulación con impedancia imaginaria

Para esta simulación se ha obtenido información de [1] en la que se ha elegido una bobina de valor $L=6H$. Para la cual su impedancia queda de la siguiente forma: $Z_L = j\omega L$.

Según la referencia [1] que se ha seguido en la cual el desarrollo se realiza para un condensador quedando con la bobina una referencia análoga, para un condensador se tienen que satisfacer:

$$I_L = L_L \frac{dV_L}{dt} = L_L \left[\frac{dV^+(z=d, t)}{dt} + \frac{dV^-(t - \frac{d}{v})}{dt} \right]$$

También usaremos la siguiente condición:

$$I_L = \frac{1}{Z_L} [V^+(z = d, t) - V^-(t - \frac{d}{v})]$$

Con las dos últimas expresiones obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{dV^-(t-d/v)}{dt} + \frac{1}{L_L Z_L} V^-(t-d/v) = -\frac{dV^+}{dt} + \frac{1}{L_L Z_L} V^+ = -\frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_G} \frac{dV_G(t-d/v)}{dt} + \frac{Z_{in}}{(Z_{in}+Z_G)(L_L Z_L)} V_G(t-d/v)$$

Particularizando la anterior expresión suponiendo que la señal que produce el generador es un escalón unitario durante un tiempo T queda la siguiente expresión:

$$\frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_G} \left(\frac{1}{L_L+Z_L} [\Pi(t-d/v) - \Pi(t-d/v-T)] - \delta(t-d/v) + \delta(t-d/v-T) \right)$$

Donde $\delta(t-\alpha)$ es la función de Dirac que proviene de la derivada de la señal escalón. Se puede integrar la anterior expresión introduciendo el factor de integración $e^{t/\tau}$, donde $\tau = L_L + Z_L$, para así poder despejar $V^-(t-d/v)$ utilizando la siguiente igualdad:

$$\frac{d}{dt}(V^- e^{t/\tau}) = e^{t/\tau} \left(\frac{dV^-}{dt} + \frac{1}{\tau} V^- \right)$$

Integrando la expresión mencionada anteriormente y utilizando la igualdad anterior nos queda la siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V^-(t-d/v) &= \frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_G} (1 - 2e^{-(vt-d)/v\tau}) & \frac{d}{v} < t \leq \frac{d}{v} + T \\ V^-(t-d/v) &= \frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_G} (-2e^{d/v\tau} + 2e^{(d+vt)/v\tau}) e^{-d/\tau} & t > \frac{d}{v} + T \end{aligned}$$

Obteniendo así una solución teórica con el siguiente aspecto, como el de la ilustración 13:

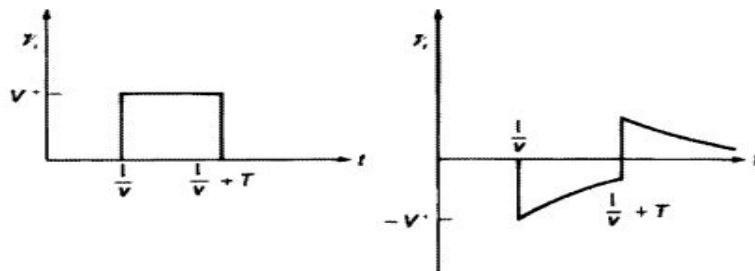


Ilustración 13. Onda incidente y reflejada en $z=d$ con impedancia imaginaria [1]

Como se puede apreciar en la ilustración anterior como se podía intuir de la expresión obtenida teóricamente de la onda reflejada al final de la línea podemos observar que tiene un comportamiento de carácter exponencial que en el caso de de que la carga al final de la línea sea un condensador dicha exponencial tendrá un sentido contrario que en el caso de que sea la carga una bobina.

Las formas de onda que se han obtenido de la simulación con la herramienta que se ha creado con el circuito de la ilustración 1, con carga una bobina de valor 6H como se ha mencionado antes y con señal de un escalón unidad de 1 segundo son los siguientes:

Onda incidente al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 14:

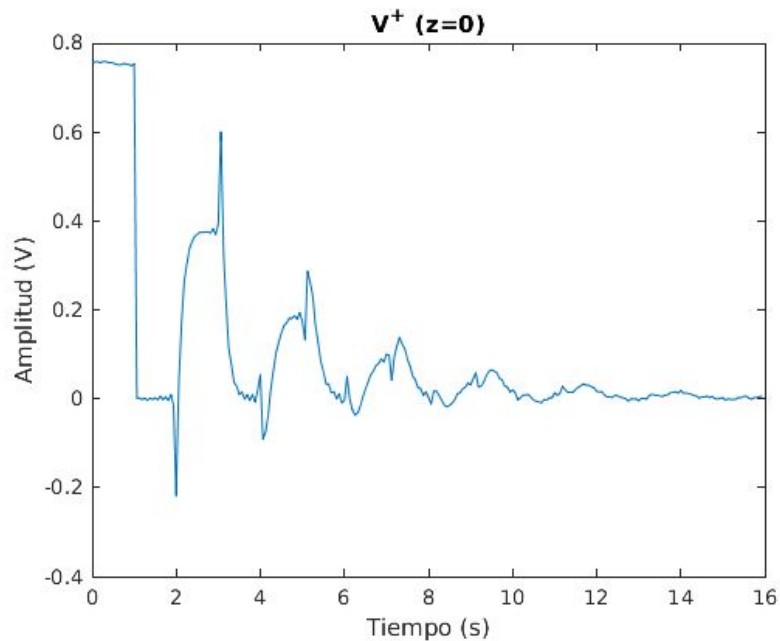


Ilustración 14. Onda incidente en $z=0$ con impedancia imaginaria

Onda reflejada al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 15:

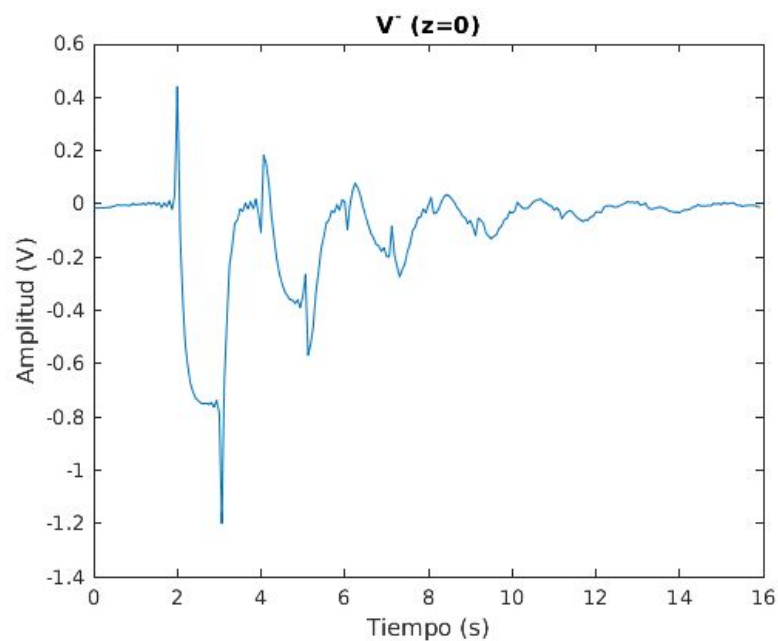


Ilustración 15. Onda reflejada en $z=0$ con impedancia imaginaria

Onda incidente al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 16:

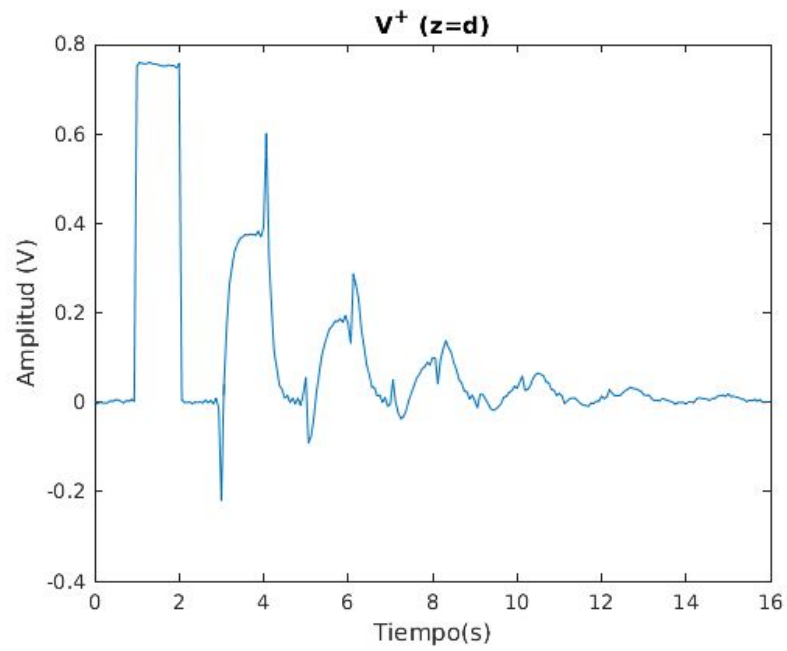


Ilustración 16. Onda incidente en $z=d$ con impedancia imaginaria

Onda reflejada al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 17:

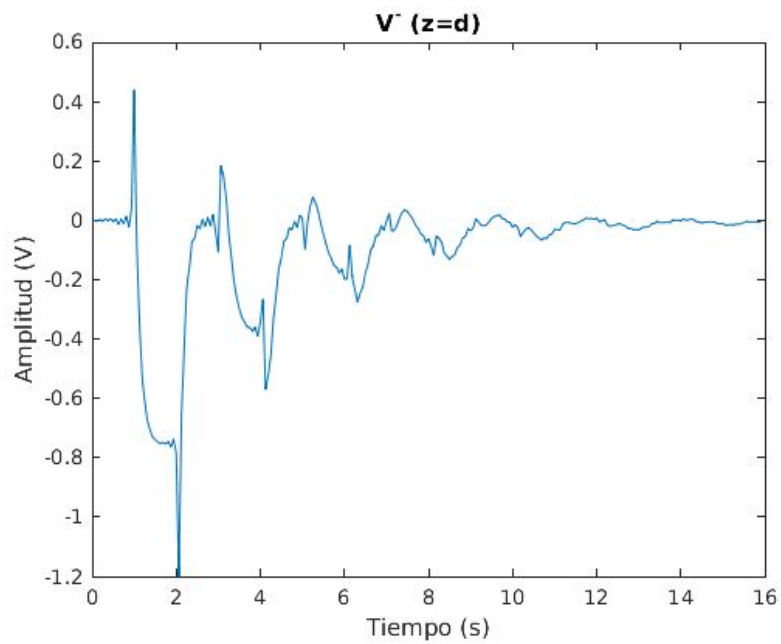


Ilustración 17. Onda reflejada en $z=d$ con impedancia imaginaria

Onda total al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 18:

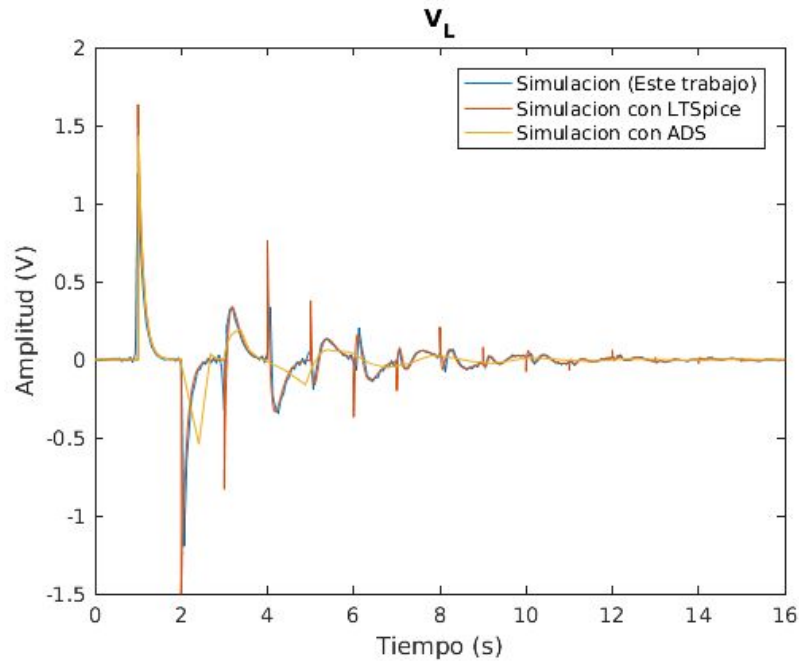


Ilustración 18. Onda total en $z=d$ con impedancia imaginaria

Para validar esta simulación se ha utilizado el siguiente circuito de LTSpice, representado en la ilustración 19:

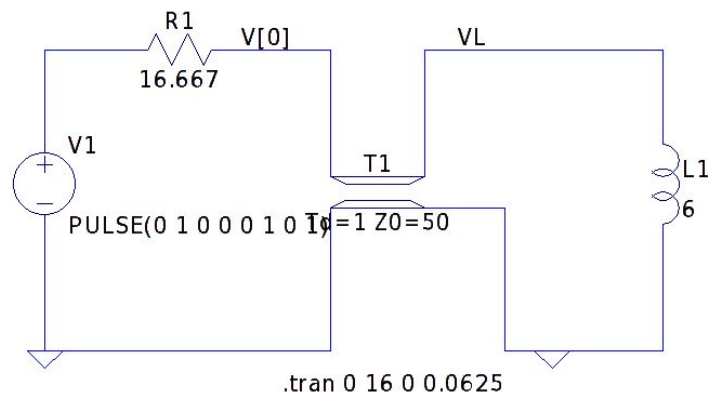


Ilustración 19. Circuito LTSpice para un escalón e impedancia imaginaria

Como se puede apreciar en la ilustración 16 se puede observar el comportamiento exponencial del que se ha comentado en el cálculo teórico disminuyendo en amplitud a lo largo del tiempo. También en la ilustración 12 se puede apreciar que en el primer segundo de simulación en la onda incidente que la forma de onda en ese segundo es la de una onda cuadrada con una amplitud ligeramente inferior a 1V. y en los demás segundos de simulación la onda va adquiriendo otra forma de onda diferente similar a la exponencial de la que se acaba de mencionar, esto se debe a la onda reflejada calculada teóricamente.

3.2. Simulación modificando la señal del generador

Para este apartado se han hecho simulaciones con diferentes tipos de señales que produce el generador para visualizar el comportamiento de las ondas en el circuito de la ilustración 1.

3.2.1. Simulación con señal periódica

Las simulaciones que se han realizado en este apartado han sido con señales periódicas como señal del generador. Para la simulación que se va a mostrar a continuación se ha utilizado como señal del generador un seno de periodo dos segundos que tiene el aspecto de la ilustración 20:

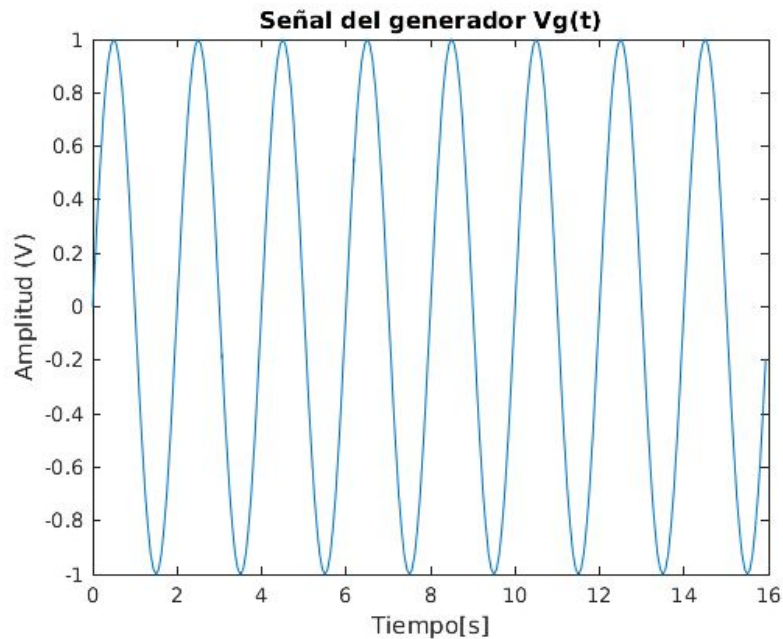


Ilustración 20. Señal del generador $\sin(\pi t)$

En la simulación con la herramienta creada se han obtenido las siguientes formas de ondas:

Onda incidente al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 21:

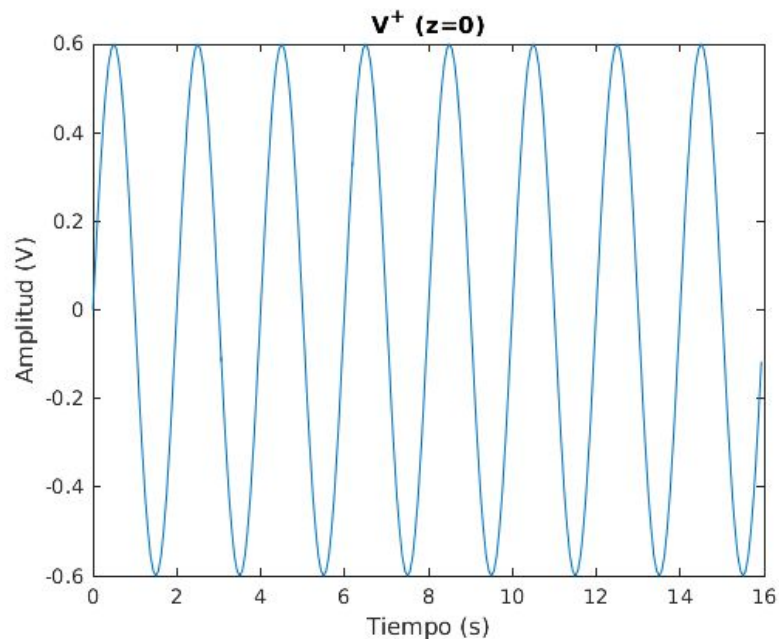


Ilustración 21. Onda incidente en $z=0$ con señal periódica

Onda incidente al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 22:

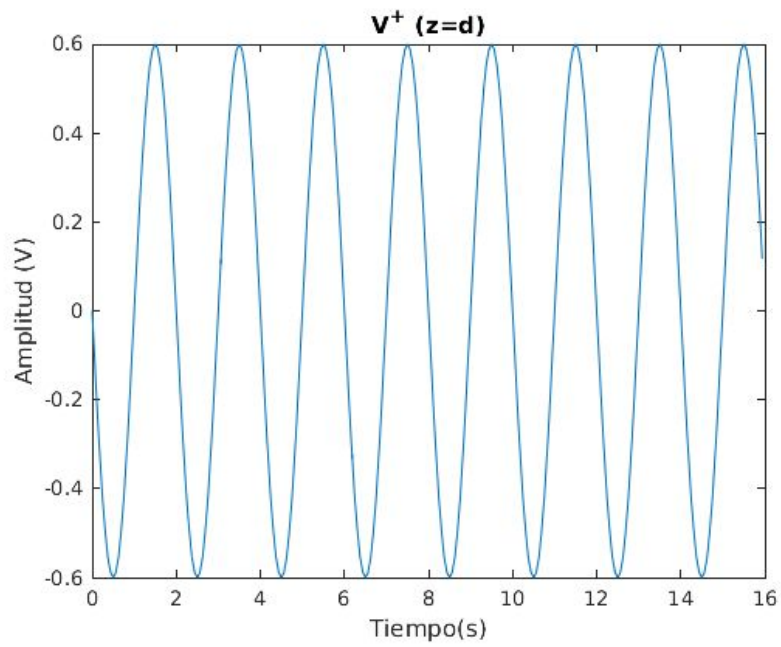


Ilustración 22. Onda incidente en $z=d$ con señal periódica

Onda reflejada al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 23:

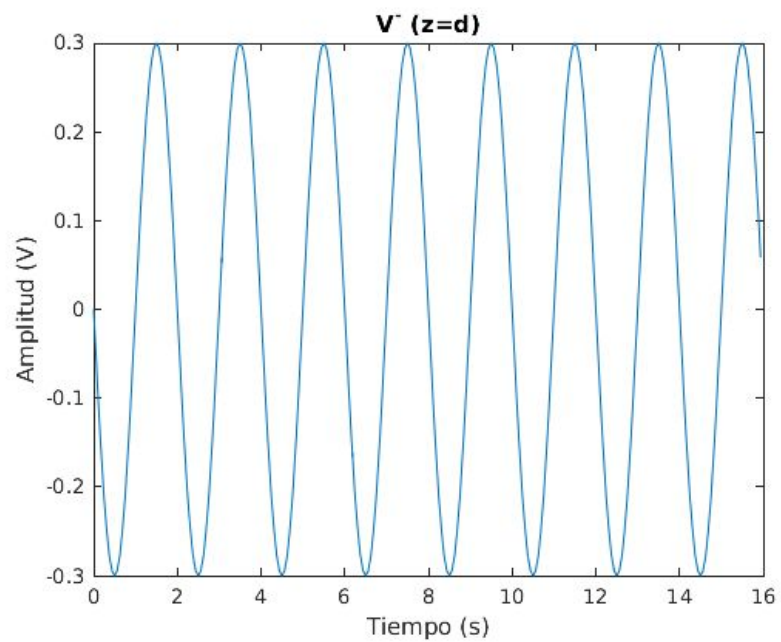


Ilustración 23. Onda reflejada en $z=d$ con señal periódica

Onda total al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 24:

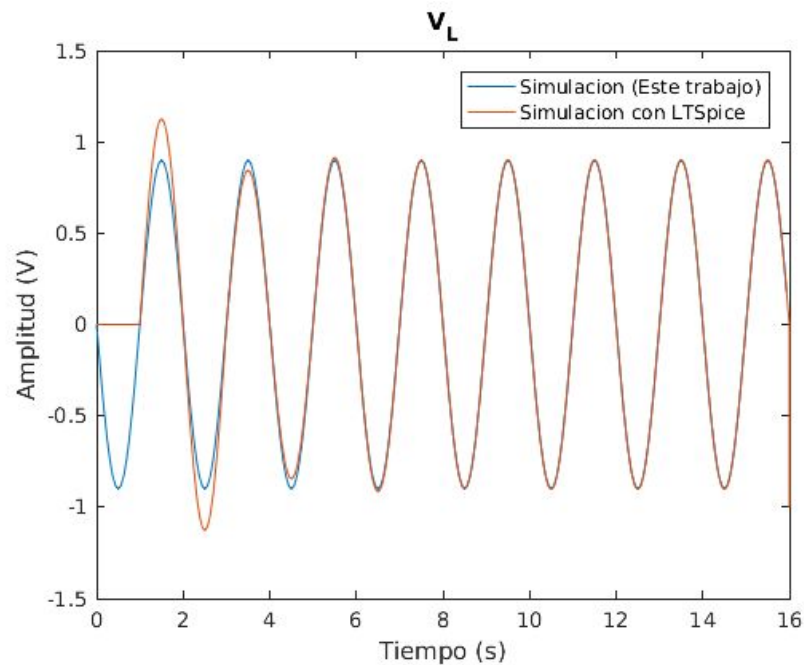


Ilustración 24. Onda total en $z=d$ con señal periódica

Como se puede observar en los resultados obtenidos, las formas de ondas resultantes son la misma onda sinusoidal escalada por el factor $\frac{Z_{in}}{Z_{in}+Z_G}$. En las ondas al final de la línea de transmisión se puede observar que en el primer segundo de simulación, se puede apreciar que la simulación de Matlab y LTSpice no coincide, ya que aparece el voltaje inicial producido por el generador en $t=0$ y por tanto, la forma de onda aparece invertida cuando está pintada en función del espacio.

3.2.2. Modulación ASK

Para este apartado se ha querido simular el comportamiento de una modulación ASK. La modulación ASK, también conocida como modulación por desplazamiento en amplitud que se basa en representar variaciones de amplitud en una secuencia de datos digitales. Las variaciones en amplitud se utilizan para expresar '0' y '1' en binario lo que implica que la señal portadora pueda ser interpretada como 'ON' y 'OFF'. Como se representa en la ilustración 25 obtenida de [9].

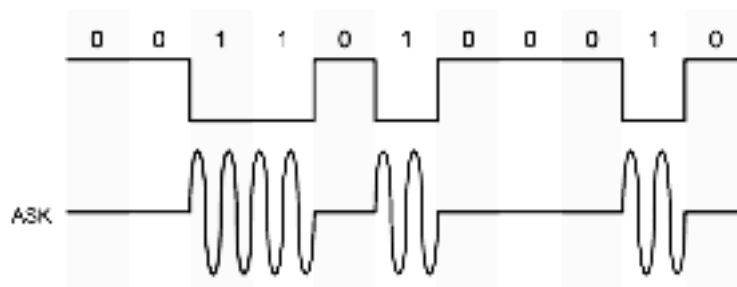


Ilustración 25. Modulación ASK [9]

26: Para la simulación se ha utilizado la siguiente señal portadora, representada en la ilustración

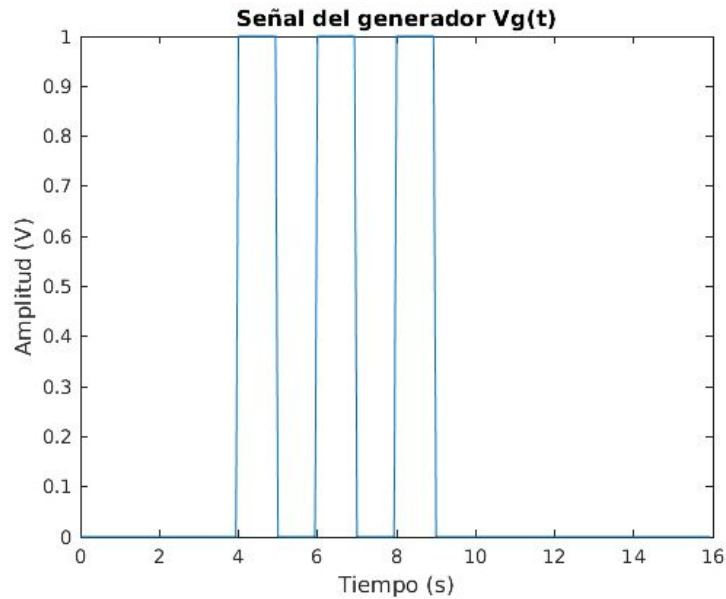


Ilustración 26. Señal portadora en modulación ASK

Para esta simulación los resultados que se esperan obtener son similares a los de la señal escalón pero con más réplicas debido a que la señal de la anterior simulación consta de tres escalones consecutivos.

Para esta simulación se han obtenido las siguientes formas de onda:

Onda incidente al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 27:

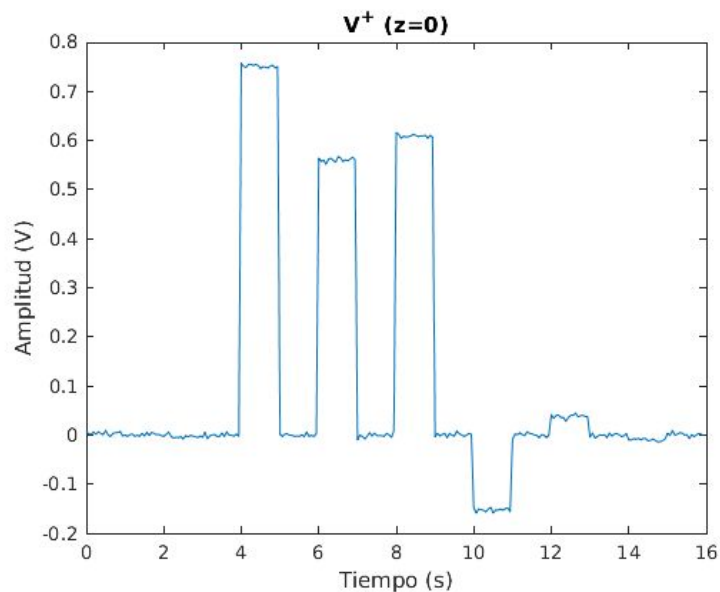


Ilustración 27. Onda incidente en $(z=0)$ en modulación ASK

Onda reflejada al comienzo de la línea de transmisión, representada en la ilustración 28:

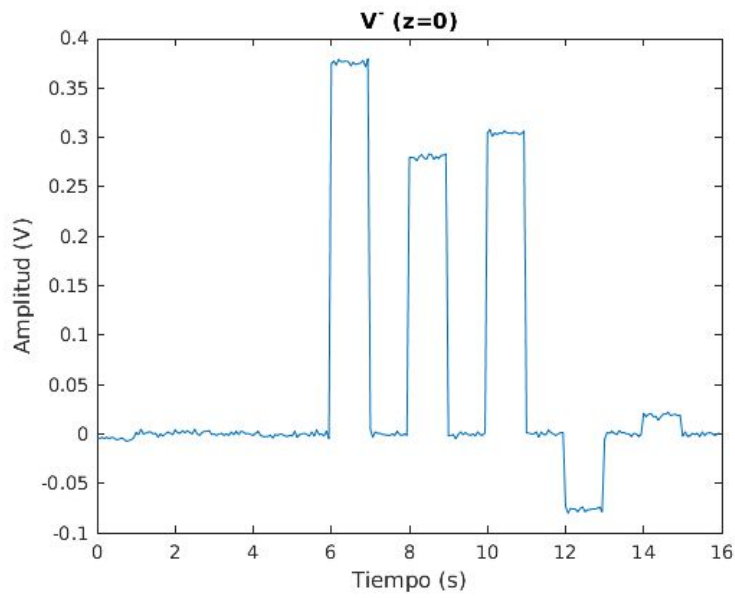


Ilustración 28. Onda reflejada en (z=0) en modulación ASK

Como se puede apreciar los resultados están siendo los esperados. Siendo similares a los obtenidos con la señal del escalón unitario, siendo la misma señal desplazada en función de la posición de la línea de transmisión.

Onda incidente al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 29:

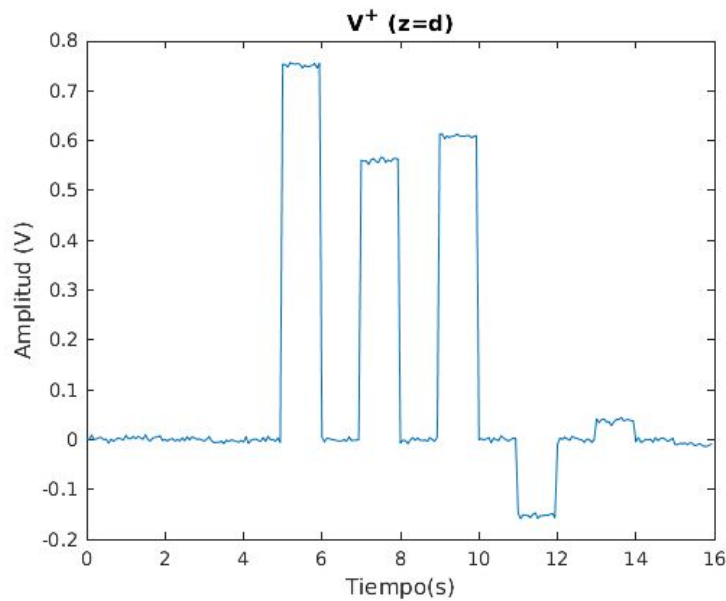


Ilustración 29. Onda incidente en (z=d) en modulación ASK

Onda reflejada al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 30:

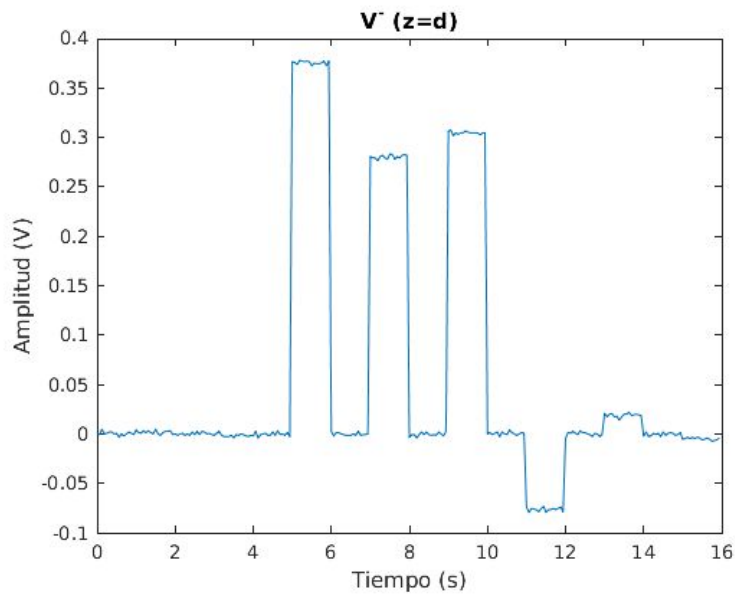


Ilustración 30. Onda reflejada en (z=d) en modulación ASK

Onda total al final de la línea de transmisión, representada en la ilustración 31:

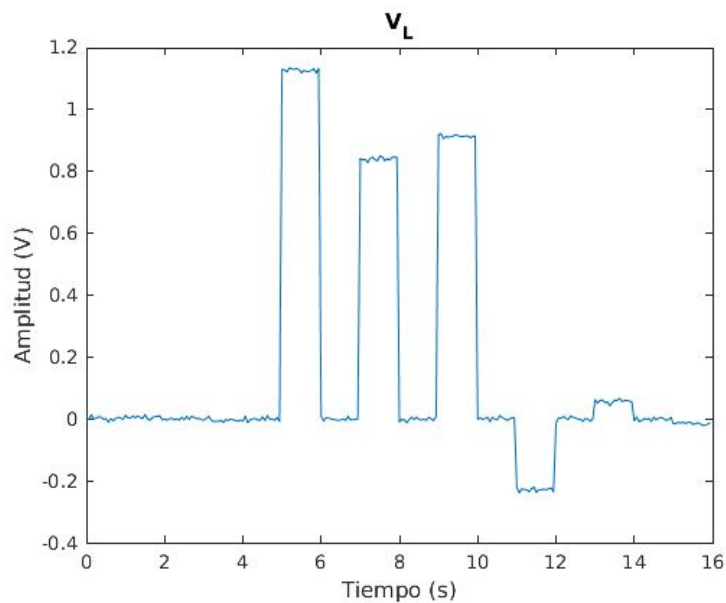


Ilustración 31. Onda total en (z=d) en modulación ASK

Como se puede apreciar en los anteriores resultados y siguiendo el comportamiento de los resultados con una señal escalón unitario aparece el fenómeno de Gibbs y como consecuencia la señal aparece desplazada un segundo con respecto a las ondas al comienzo y al final de la línea de transmisión observando como las formas de onda van disminuyendo en amplitud hasta acaba en una amplitud nula.

4. Simulación de circuitos con dos líneas de transmisión

En este apartado se van a resolver y simular circuitos con dos líneas de transmisión como el siguiente, representado en la ilustración 32:

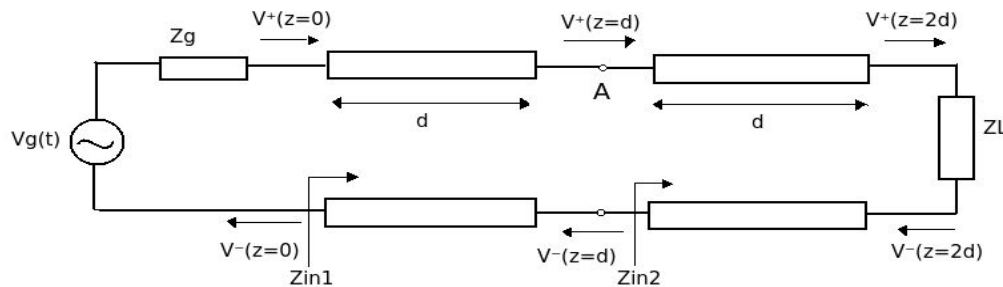


Ilustración 32. Circuito con dos líneas de transmisión en serie

Para la resolución de este circuito se ha seguido un proceso muy similar que para la resolución del circuito de la ilustración 1. Para ello lo primero que se ha calculado es la impedancia vista en la segunda línea de transmisión que la denotaremos como Z_{in2} , siendo Z_{in1} la impedancia vista en la primera línea de transmisión. Se ha calculado mediante la fórmula de la impedancia vista en cualquier punto de la línea ya definida en los principios teóricos. Una vez calculada Z_{in2} el circuito quedaría simplificado al circuito de la ilustración 1, siendo Z_L del circuito de la primera ilustración en este caso Z_{in2} ya calculado. Por tanto, el proceso que se ha seguido para resolver el resto del circuito es el mismo que para el circuito con una línea de transmisión. Salvo que las ondas incidentes y reflejadas al final de la primera línea y al comienzo de la segunda son iguales.

Para la simulación de este circuito se han escogido dos líneas de las mismas características. Eligiendo como impedancias características de las líneas $Z_{o1} = Z_{o2} = 50\Omega$, como longitud de línea se ha escogidos líneas de $3 \cdot 10^8$ m, como impedancia del generador $Z_G = Z_{o1}/3$ y como impedancia de carga $Z_L = 3Z_{o1}$. Como señal del generador se ha elegido la señal de la ilustración 2. Durante la simulación se han obtenido los siguientes resultados:

Onda incidente al comienzo de la primera línea de transmisión, representada en la ilustración 33:

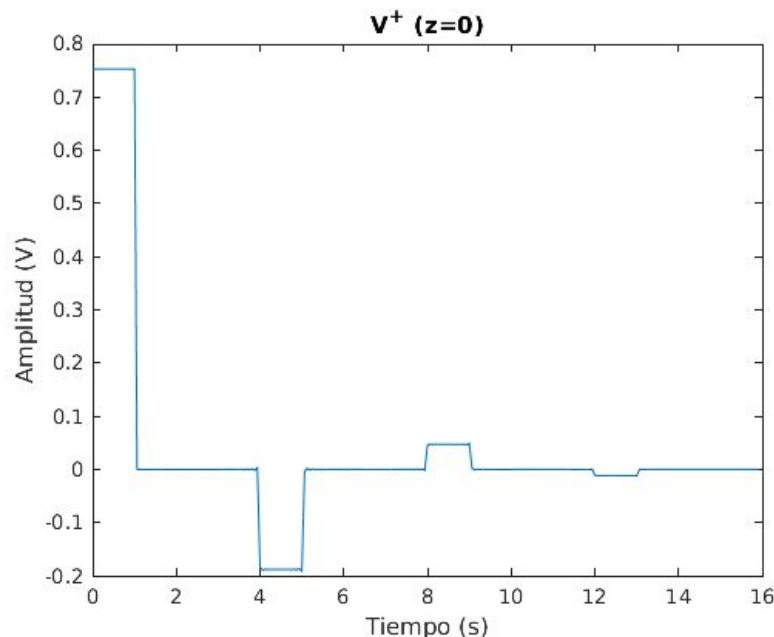


Ilustración 33. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 2 líneas de transmisión

Onda incidente al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 34:

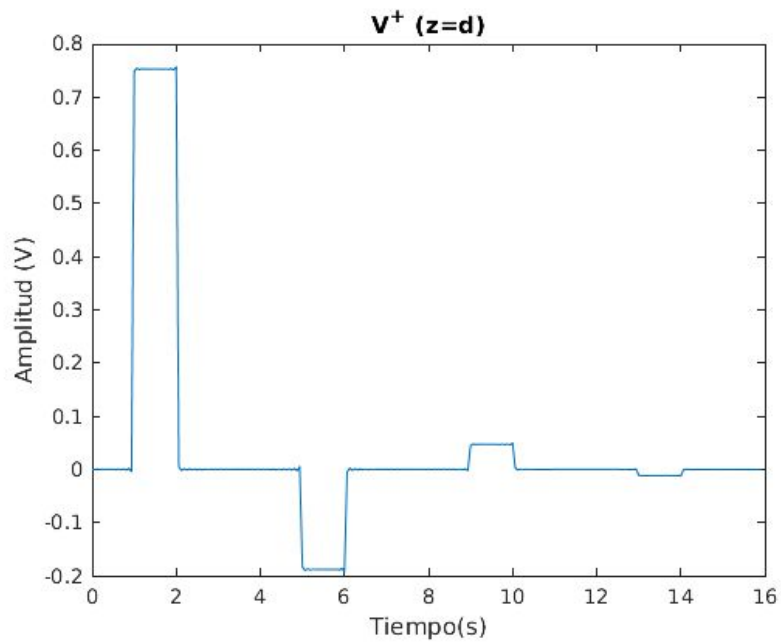


Ilustración 34. Onda incidente en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Onda reflejada al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 35:

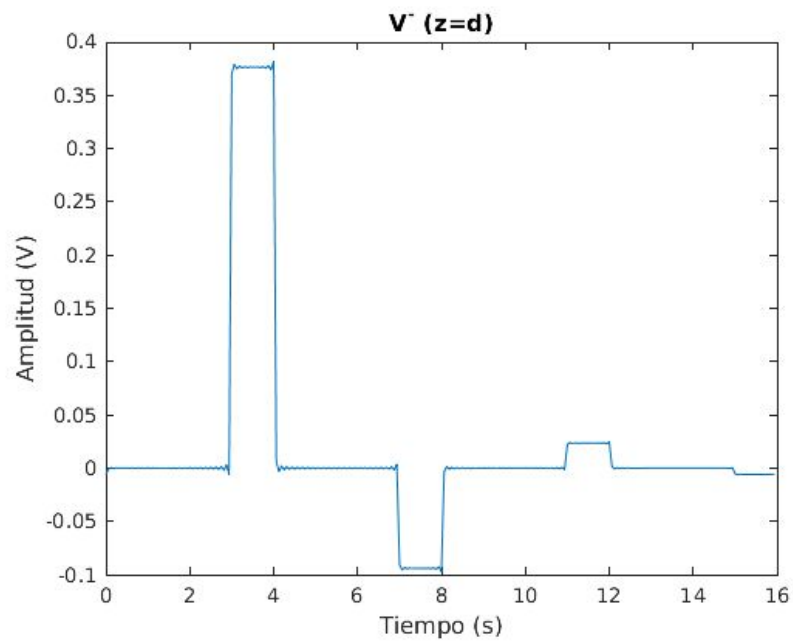


Ilustración 35. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Onda total al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 36:

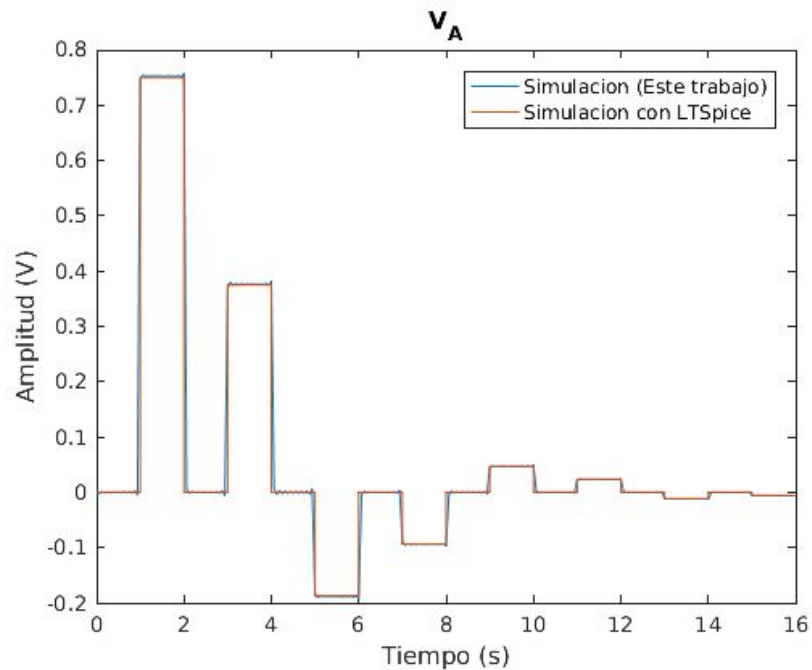


Ilustración 36. Onda total en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Se puede apreciar en esta última ilustración que la forma de onda obtenida al final de la primera sección y al comienzo de la segunda obtenidos con la herramienta que hemos realizado es el mismo que la obtenida por la herramienta de LTSpice.

Onda incidente al final de la segunda línea, representada en la ilustración 37:

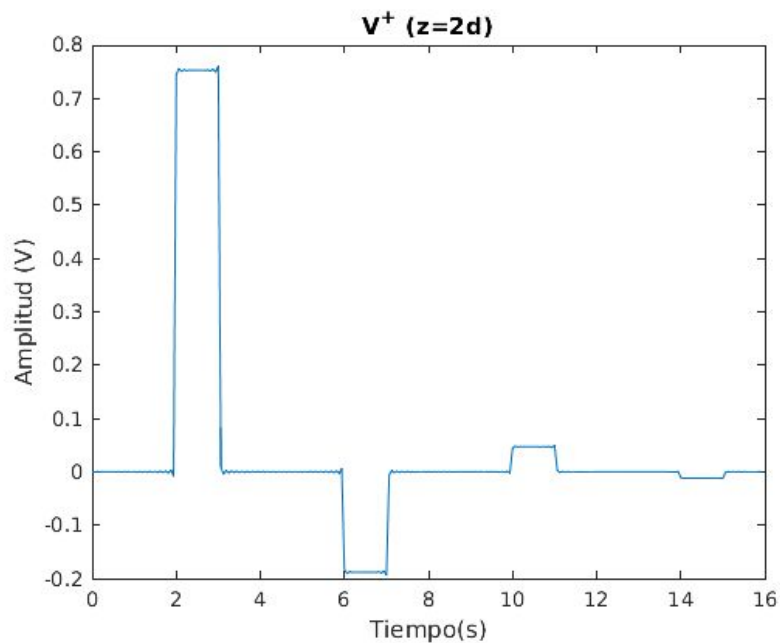


Ilustración 37. Onda incidente en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Onda reflejada al final de la segunda línea, representada en la ilustración 38:

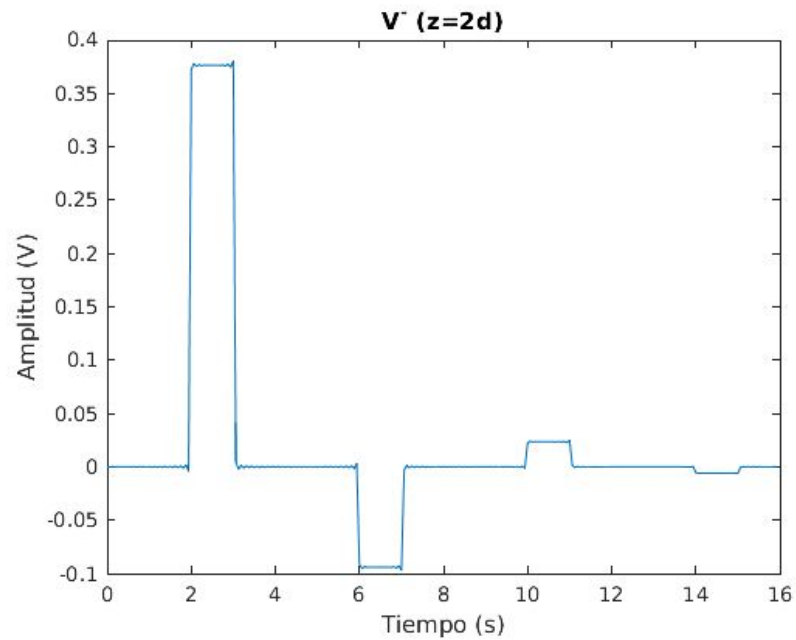


Ilustración 38. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Onda total al final de la segunda línea de transmisión, representada en la ilustración 39:

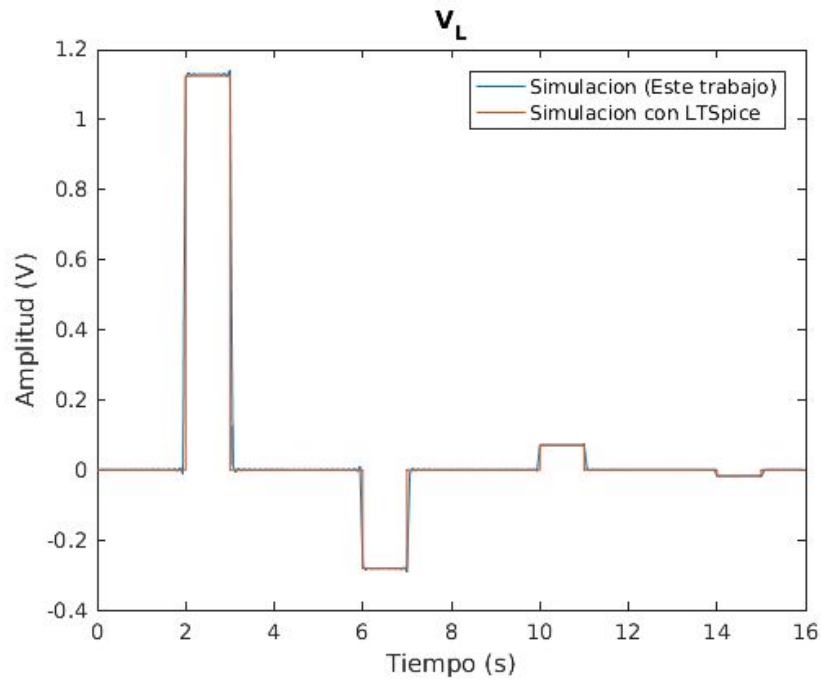


Ilustración 39. Onda total en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión

Se puede apreciar en los resultados de las simulaciones anteriores que si ambas líneas tienen las mismas características los resultados serían iguales a un circuito con una línea de transmisión de longitud doble.

El circuito de LTSpice que se ha utilizado para las anteriores simulaciones es el siguiente, representado en la ilustración 40:

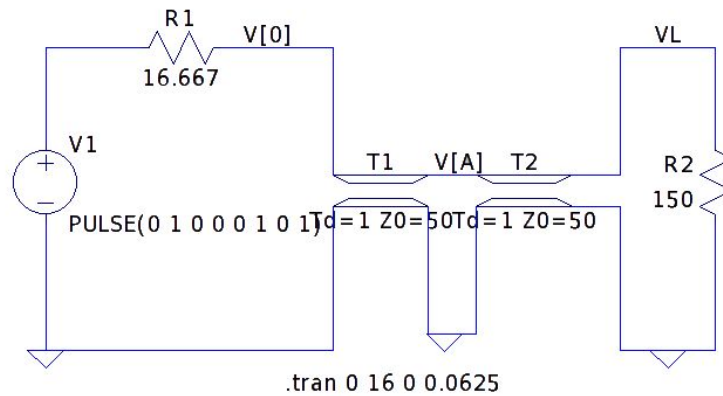


Ilustración 40. Circuito LTSpice de 2 líneas de transmisión

4.1. Modificando la impedancia característica de las líneas

En este apartado se modificarán las impedancias características de las líneas de transmisión del circuito de la figura 32. Para la siguiente simulación solamente se ha modificado la impedancia característica de la segunda línea dándole un valor de 75Ω . Los demás elementos tienen los mismos valores. Se han obtenido los siguientes resultados:

Onda incidente al comienzo de la primera línea de transmisión, representada en la ilustración 41:

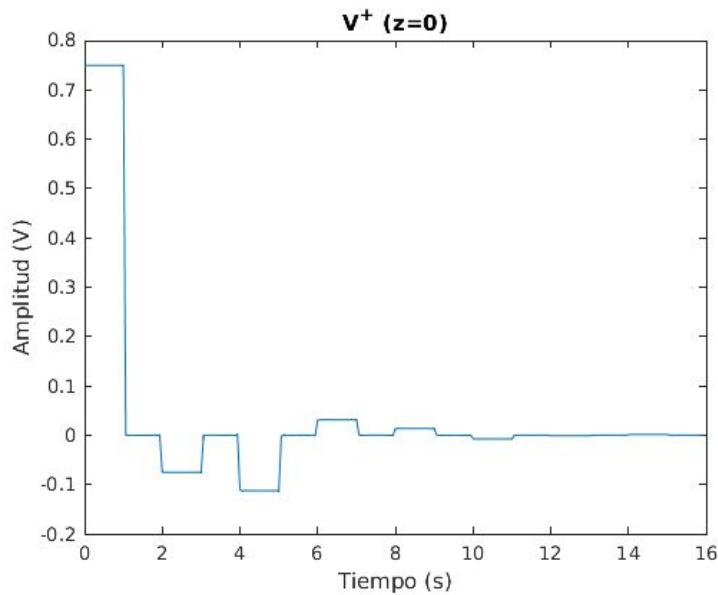


Ilustración 41. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$

Onda incidente al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 42:

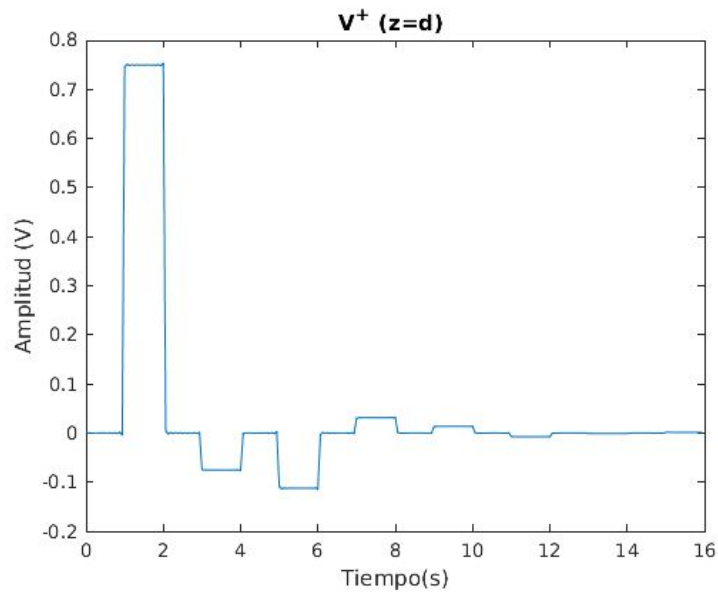


Ilustración 42. Onda incidente en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2} = 75\Omega$

Por los resultados en los primeros resultados de la simulación podemos observar que las formas de ondas que vamos obteniendo por la modificación de la impedancia característica son diferentes a los de la simulación anterior.

Onda reflejada al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 43:

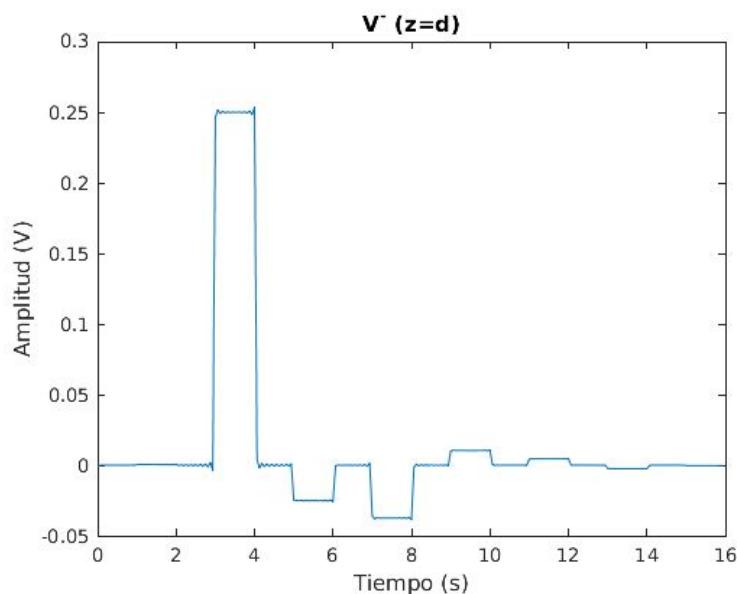


Ilustración 43. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2} = 75\Omega$

Onda total al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 44:

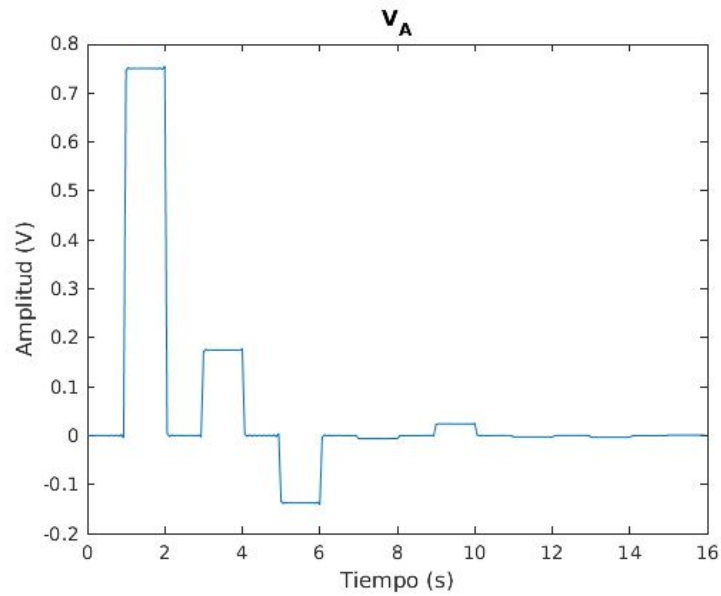


Ilustración 44. Onda total en $z=d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$

Onda incidente al final de la segunda línea, representada en la ilustración 45:

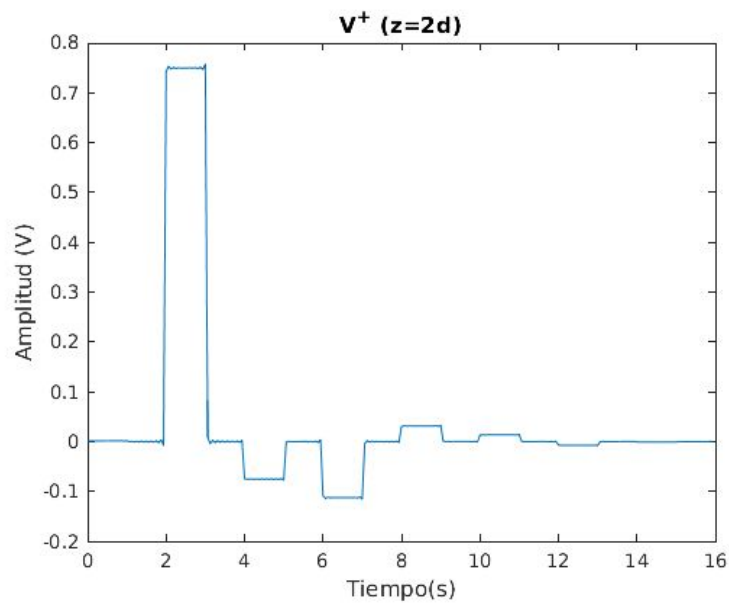


Ilustración 45. Onda incidente en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$

Onda reflejada al final de la segunda línea, representada en la ilustración 46:

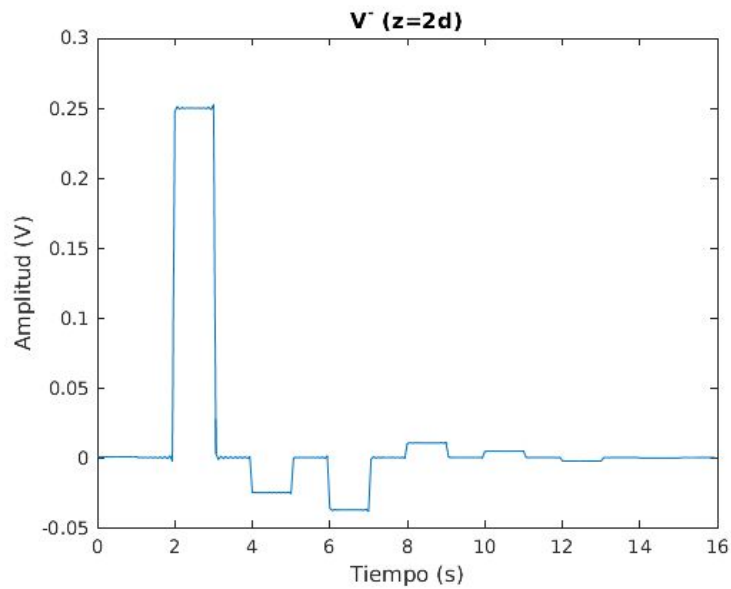


Ilustración 46. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$

Como se puede apreciar en todos los resultados anteriores y en comparación con los resultados de la simulación anterior se puede apreciar que las ondas se propagan cada menos tiempo que en la simulación, es decir existen cada menos tiempo en la simulación réplicas con distinta amplitud de la señal de origen.

Onda total al final de la segunda línea de transmisión, representada en la ilustración 47:

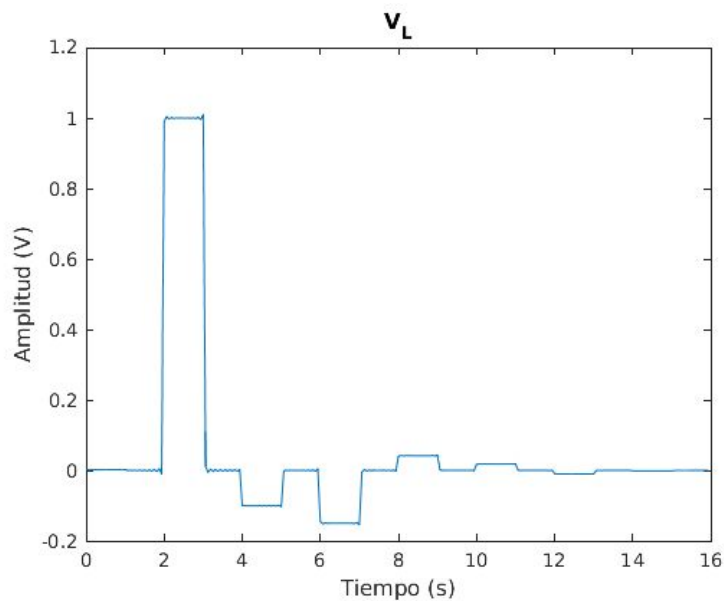


Ilustración 47. Onda total en $z=2d$. Circuito 2 líneas de transmisión $Z_{o2}=75\Omega$

Como se puede apreciar en esta última ilustración si comparamos los resultados de la ilustración 39, podemos apreciar que al modificar una de las impedancias características de las líneas las ondas se propagan más rápido, por lo que aparecen más réplicas de la forma de onda del generador con el retardo aplicado de las líneas atenuándose hasta adquirir una amplitud de cero voltios.

4.2. Modificando el número de impedancias del circuito

En este apartado se va a simular un circuito parecido al del apartado anterior pero con una carga en paralelo entre ambas líneas de transmisión. El circuito ha sido diseñado para que ambas secciones tengan el comportamiento de un transformador $\lambda/4$. El circuito tiene el siguiente aspecto, como el de la ilustración 48.

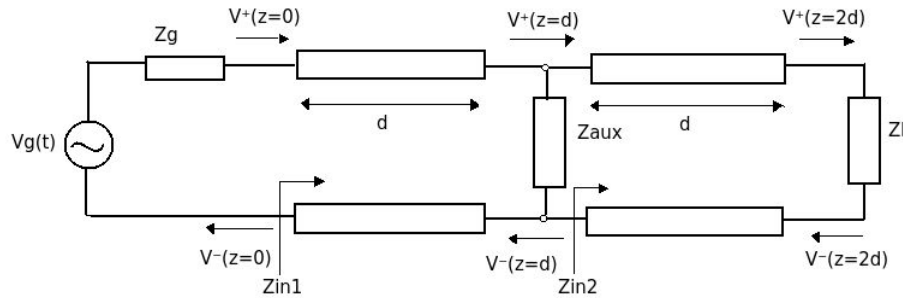


Ilustración 48. Circuito transformador $\lambda/4$

Los transformadores $\lambda/4$ es uno de los adaptadores de impedancias más sencillos para obtener la impedancia que queremos en una línea de transmisión. Dicho adaptador consta de una línea de transmisión de longitud $\lambda/4$ a una frecuencia de diseño. Uno de los inconvenientes de dicho transformador se trata de solamente transforma impedancias reales, por tanto si quisiéramos aplicar dicho transformador para una impedancia compleja no se podría ya que para transformar una impedancia compleja en una real se debería modificar la longitud de la sección o incluir algún otro elemento a nuestro circuito. Si asumimos que el medio de propagación no tiene pérdidas, la expresión de la impedancia vista en cualquier punto de la línea nos quedaría de la siguiente manera:

$$Z_{in} = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

Por lo que si queremos diseñar este circuito para que ambas secciones sean un transformador $\lambda/4$, para la primera sección nuestro Z_L se corresponderá con el paralelo entre la impedancia vista en la segunda línea y la impedancia Z_A . Dicho paralelo queda con una expresión de la cual se podrá deducir la expresión de la impedancia característica de la primera sección:

$$Z_{Par} = \frac{Z_{o2}^2 + Z_L Z_A}{Z_{o2}^2 Z_A} \quad Z_{o1} = \sqrt{Z_G \cdot \left(\frac{Z_{o2}^2 + Z_L Z_A}{Z_{o2}^2 Z_A} \right)}$$

Para la simulación del circuito con nuestra herramienta se ha elegido como impedancia del generador $Z_G=16.667\Omega$, $Z_L=150\Omega$, $Z_A=70\Omega$, mientras que nuestra frecuencia de diseño es $f_0=1\text{Hz}$. Como impedancia característica de la segunda sección se ha elegido $Z_{o2}=15\Omega$, ya que ambas impedancias características están relacionadas para que ambas secciones actúen como transformadores $\lambda/4$.

Para la resolución de dicho circuito se ha seguido un proceso similar al del circuito del apartado anterior. Una vez calculado Z_{in2} , se ha realizado el paralelo de dicha impedancia con Z_A , dando lugar de nuevo al circuito de la ilustración 1, siendo en este caso Z_L del circuito de la ilustración 1 igual al paralelo que acabamos de mencionar. A partir de aquí se ha realizado un proceso análogo al del primer circuito. La única excepción a la hora de resolver el circuito sobre los circuitos ya realizados es que la onda incidente al final de la primera línea no es la misma que la incidente al comienzo de la segunda. Para su cálculo se han comparado las ondas totales en dicho punto relacionando onda incidente y reflejada por su respectivo coeficiente de reflexión. Quedando la siguiente relación:

$$V_2^+(z=d, f) = V_1^+(z=d, f) \frac{(1+p_{1A})}{(1+p_{2A})}$$

Los resultado que se han obtenido de la simulación son los siguientes:

49:

Onda incidente al comienzo de la primera línea de transmisión, representada en la ilustración

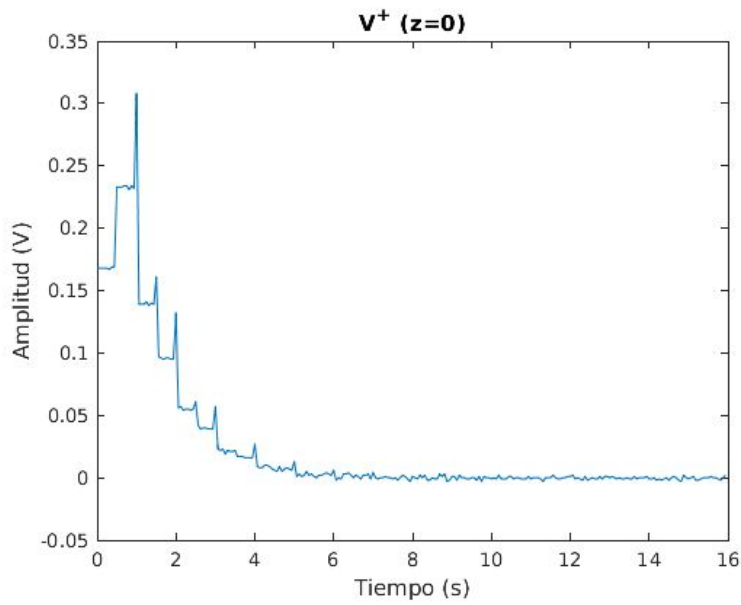


Ilustración 49. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito $\lambda/4$

Onda incidente al final de la primera línea, representada en la ilustración 50:

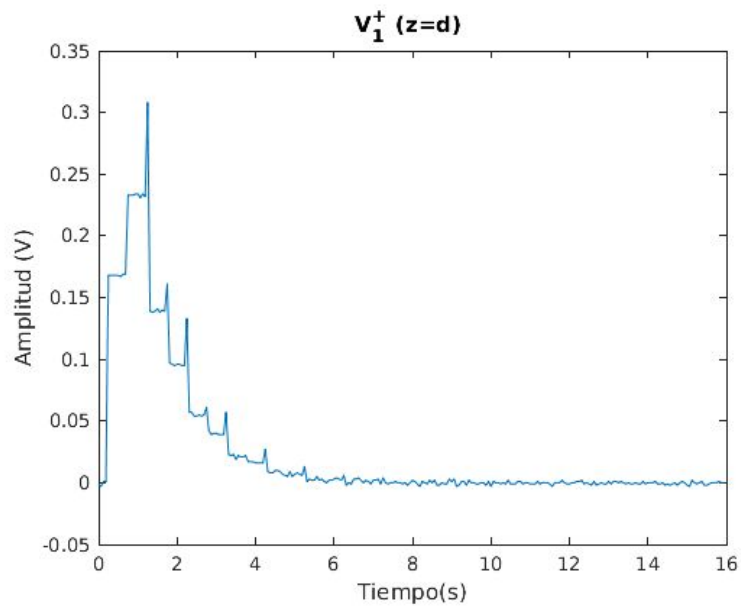


Ilustración 50. Onda incidente en $z=d$. Circuito $\lambda/4$

Onda reflejada al final de la primera línea, representada en la ilustración 51:

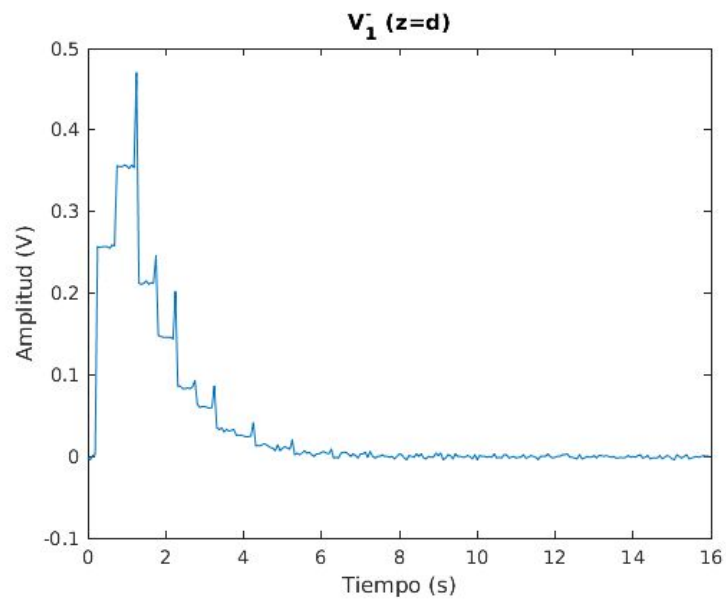


Ilustración 51. Onda reflejada en $z=d$. Circuito $\lambda/4$

En los primeros resultados obtenidos en la simulación podemos observar que las formas de ondas que se van obteniendo están siendo bastante similares entre sí, adquiriendo las ondas una disminución en amplitud en función del tiempo, que es el resultado esperado.

Onda total al final de la primera línea y al comienzo de la segunda, representada en la ilustración 52:

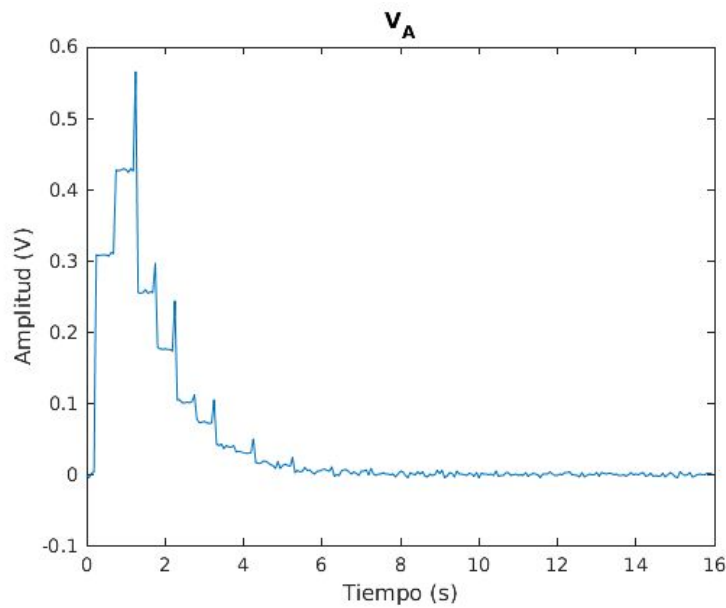


Ilustración 52. Onda total en $z=d$. Circuito $\lambda/4$

Onda incidente al comienzo de la segunda línea, representada en la ilustración 53:

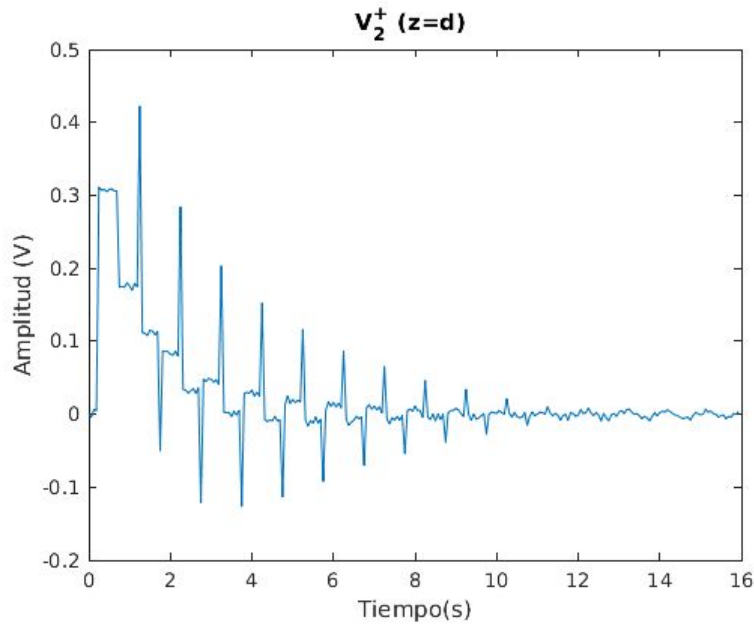


Ilustración 53. Onda incidente en $z=d_2$. Circuito $\lambda/4$

Onda reflejada al comienzo de la segunda línea, representada en la ilustración 54:

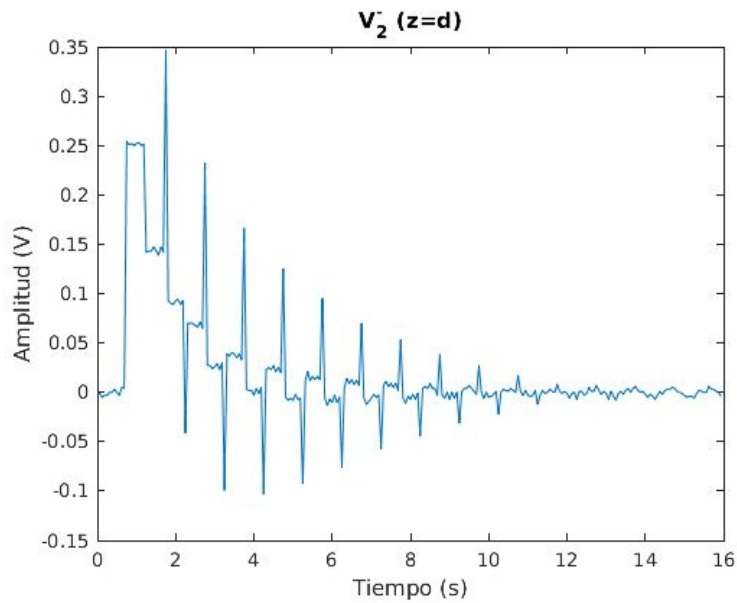


Ilustración 54. Onda reflejada en $z=d_2$. Circuito $\lambda/4$

Como se puede apreciar en los anteriores resultados la onda total en el punto 'A' es exactamente en el mismo tanto si se calcula con las ondas incidentes y reflejadas al final de la primera sección que con las ondas del comienzo de la segunda sección.

Onda incidente al final de la segunda línea de transmisión, representada en la ilustración 55:

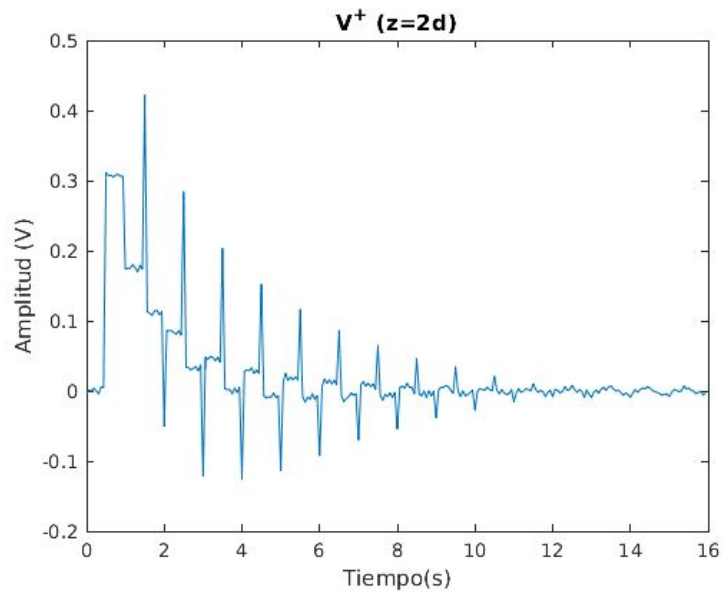


Ilustración 55. Onda incidente en $z=2d$. Circuito $\lambda/4$

Onda incidente al final de la segunda línea de transmisión, representada en la ilustración 56:

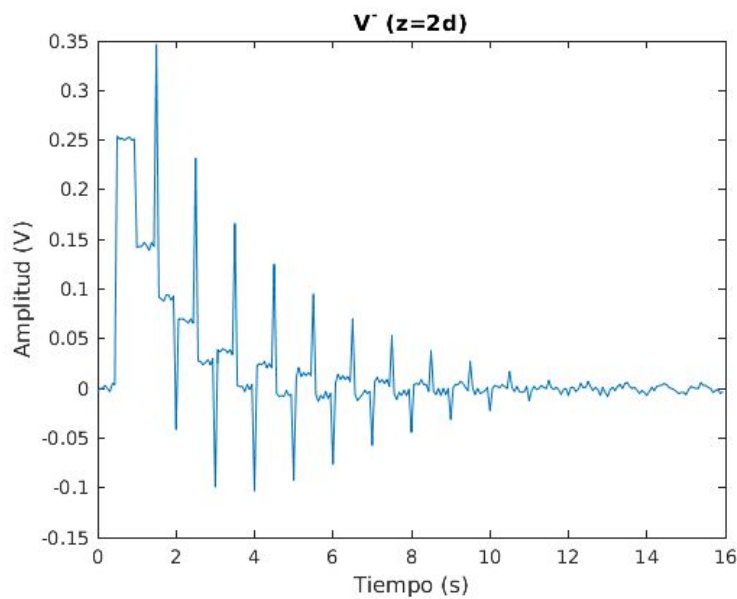


Ilustración 56. Onda reflejada en $z=2d$. Circuito $\lambda/4$

Onda incidente al final de la segunda línea de transmisión, representada en la ilustración 57:

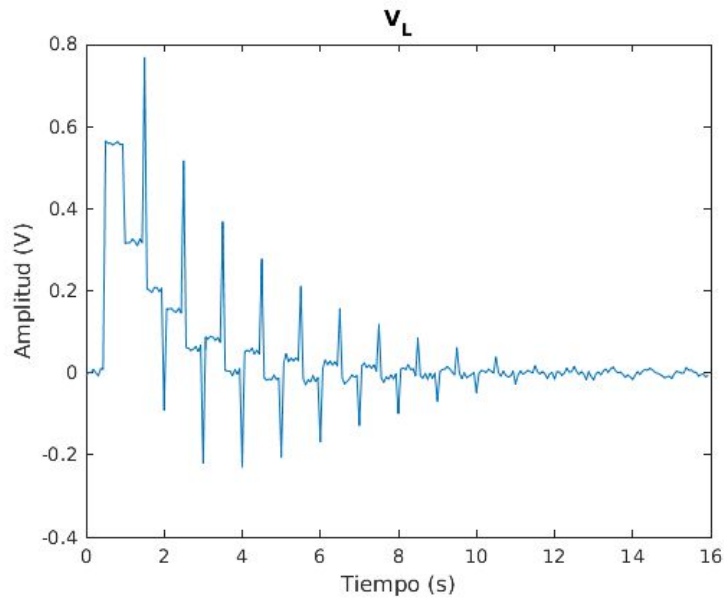


Ilustración 57. Onda total en $z=2d$. Circuito $N/4$

Se puede apreciar que el comportamiento en este circuito era el esperado, ya que tiene bastantes similitudes con las simulaciones anteriores. Se puede apreciar que las ondas a medida que se propagan a través de las secciones van tomando un pequeño retardo en el tiempo a medida que se van atenuando de manera exponencial hasta llegar a amplitud nula.

5. Circuitos con tres líneas de transmisión

Para este apartado se ha resuelto un circuito con una línea de transmisión en serie con dos líneas de transmisión que se encuentran en paralelo. El circuito tiene el aspecto de la ilustración 58.

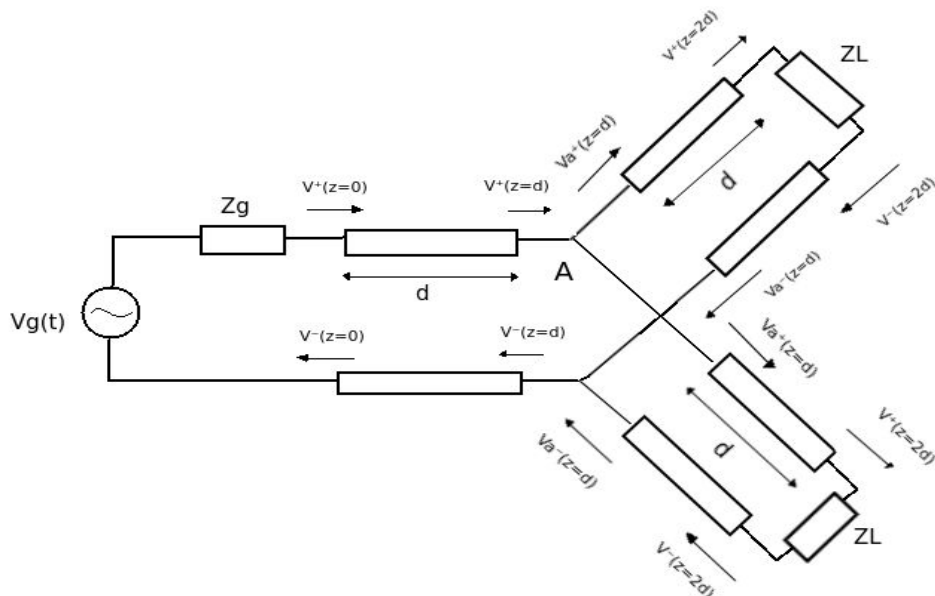


Ilustración 58. Circuito con 3 líneas de transmisión

Para la resolución del circuito anterior se han calculado las impedancias vistas en las dos líneas que se encuentran en paralelo mediante la fórmula de la impedancia vista en cualquier punto

de la línea, las cuales denotaremos como Z_{up} y Z_{down} . Calculando el paralelo de ambas impedancias nuestro circuito queda simplificado al circuito de la ilustración 1. Por tanto, para calcular la onda incidente al final de la primera línea se calculará de manera análoga a los demás circuitos.

Para calcular las ondas incidentes al comienzo de las líneas que se encuentran en paralelo se han utilizado los cálculos ya realizados de Z_{up} y Z_{down} . Una vez ya calculada la onda incidente al final de la primera línea de transmisión, para calcular la onda incidente al comienzo de la línea de arriba del paralelo se utilizará el cálculo de Z_{down} , ya que mediante esta impedancia nos queda una situación similar a la del circuito de la ilustración 48, siendo en este caso Z_{down} la impedancia Z_A del circuito que acabamos de mencionar. Para el cálculo de la onda incidente de la línea de abajo del paralelo se calcularía de manera análoga a la onda incidente de la sección de arriba del paralelo. Mediante la simulación de este circuito se han obtenido los siguientes resultados:

Onda incidente al comienzo de la primera línea de transmisión, representada en la ilustración 59:

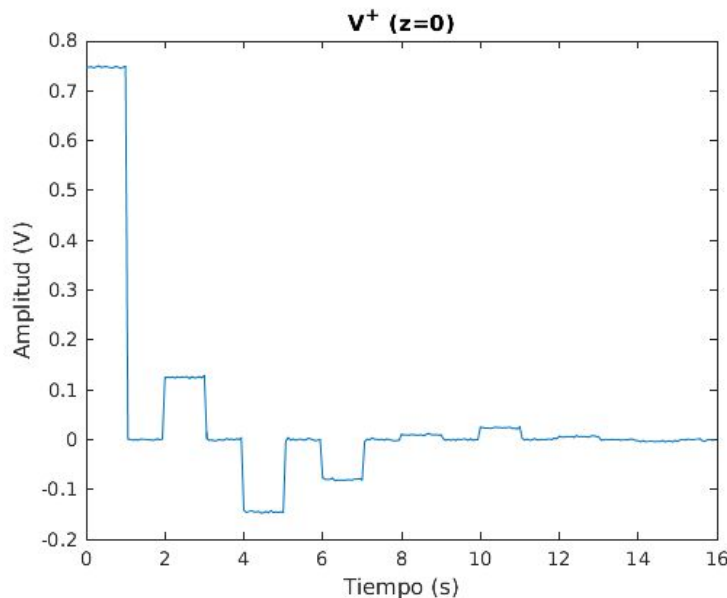


Ilustración 59. Onda incidente en $z=0$ primera línea. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda incidente al final de la primera línea, representada en la ilustración 60:

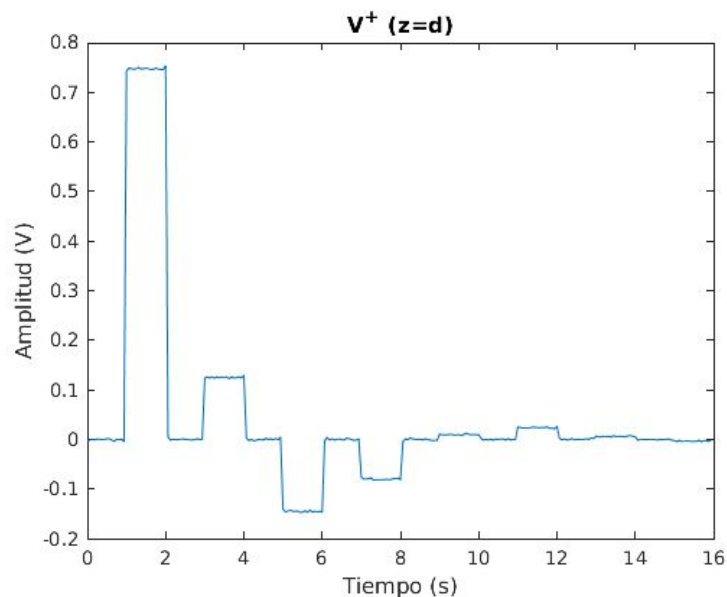


Ilustración 60. Onda incidente en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda reflejada al final de la primera línea, representada en la ilustración 61:

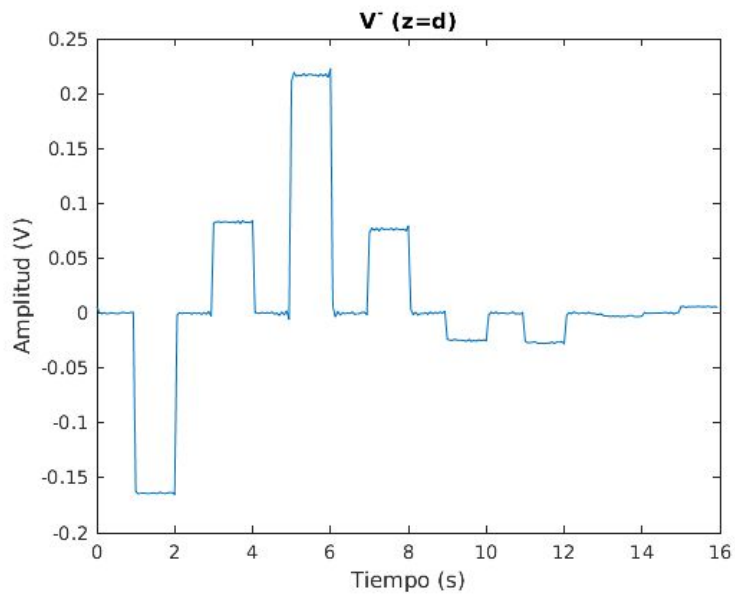


Ilustración 61. Onda reflejada en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda total al final de la primera línea y al comienzo de la dos en paralelo, representada en la ilustración 62:

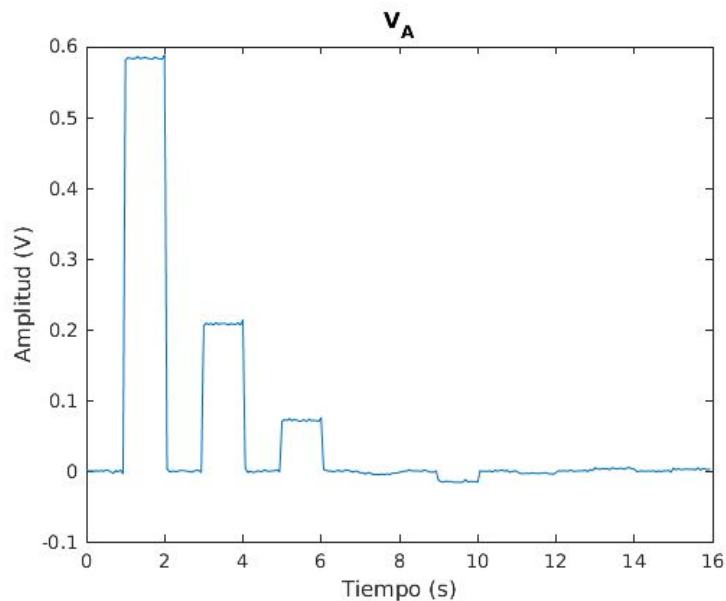


Ilustración 62. Onda total en $z=d$. Circuito 3 líneas de transmisión

Debido a los valores que se han introducido en las variables de las dos líneas en paralelo, cuyos parámetros son exactamente idénticos, sus ondas también son exactas por lo que se va a proceder a mostrar solamente las ondas de la línea de arriba.

Onda incidente al comienzo de la línea de arriba, representada en la ilustración 63:

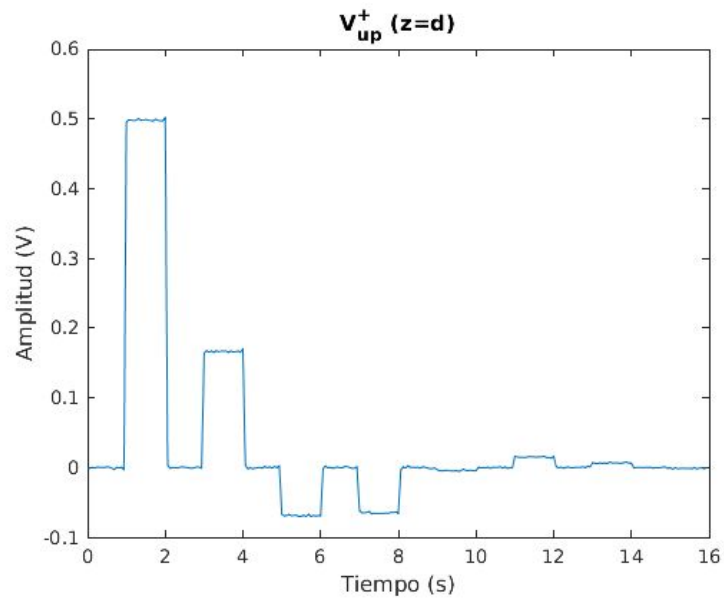


Ilustración 63. Onda incidente en $z=d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda reflejada al comienzo de la línea de arriba, representada en la ilustración 64:

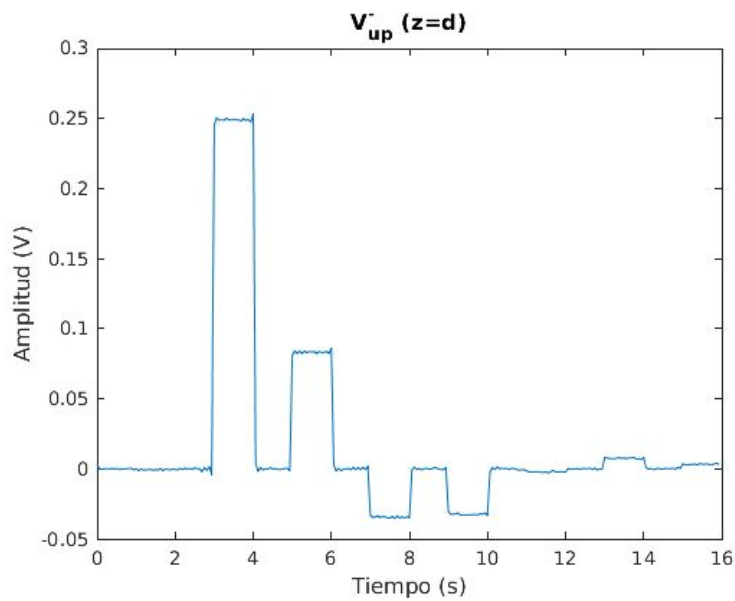


Ilustración 64. Onda reflejada en $z=d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda incidente al final de la línea de arriba, representada en la ilustración 65:

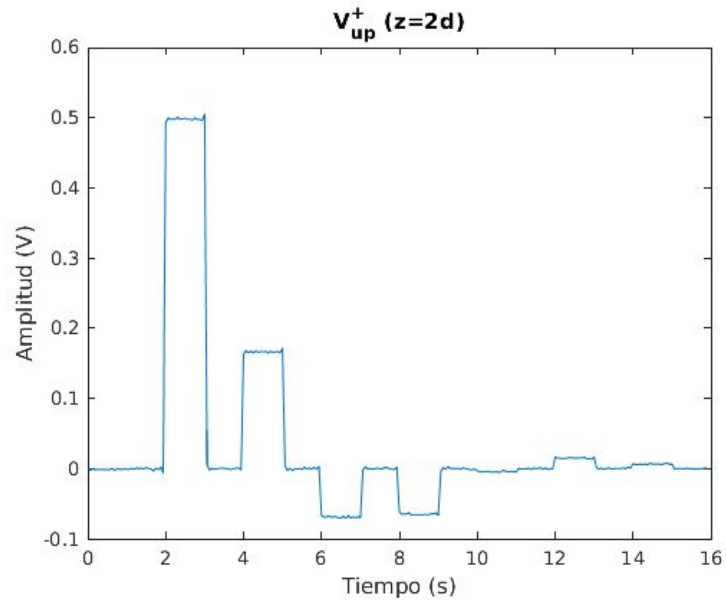


Ilustración 65. Onda incidente en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión

Por los resultados que se han ido obteniendo en la simulación se puede apreciar que el comportamiento es bastante similar al de los demás circuitos con impedancias reales.

Onda reflejada al final de la línea de arriba, representada en la ilustración 66:

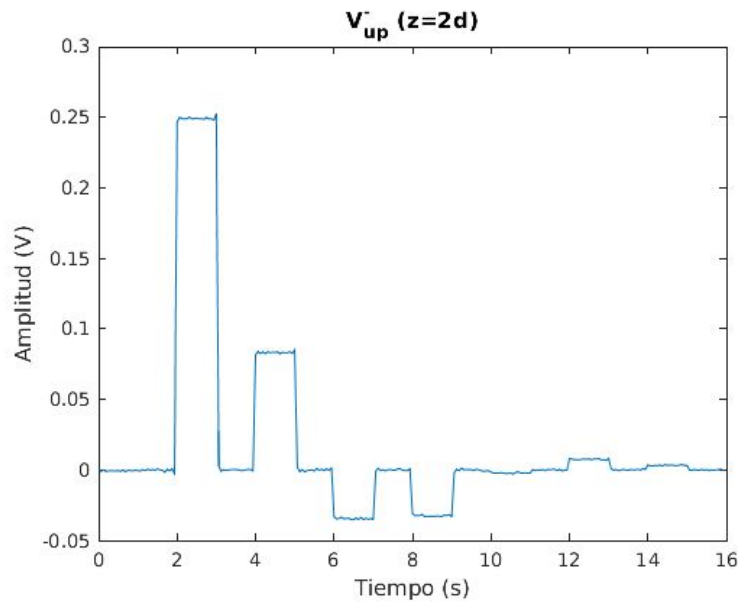


Ilustración 66. Onda reflejada en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión

Onda total al final de la línea de arriba, representada en la ilustración 67:

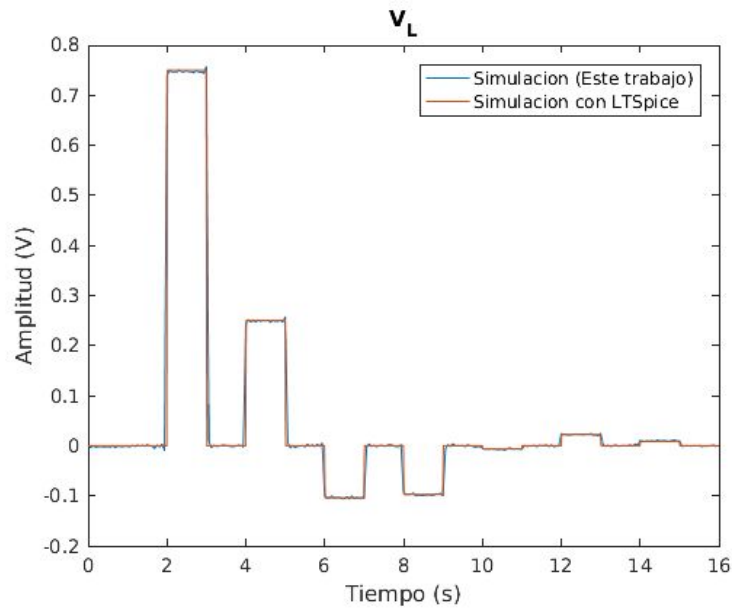


Ilustración 67. Onda total en $z=2d_{up}$. Circuito 3 líneas de transmisión

Como ya se ha dicho se puede apreciar en el paralelo como la onda se reduce en amplitud respecto a su forma de onda al final de la primera línea de transmisión obteniendo una onda total como la de la última ilustración. Como ya se ha comentado y en vista a los resultados obtenidos por otras simulaciones, si las impedancias características fueran distintas en las secciones que se encuentran en paralelo se obtendrían formas de onda distintas para cada rama.

Los resultados se han comparado con el siguiente circuito simulado en LTSpice, representado en la ilustración 68:

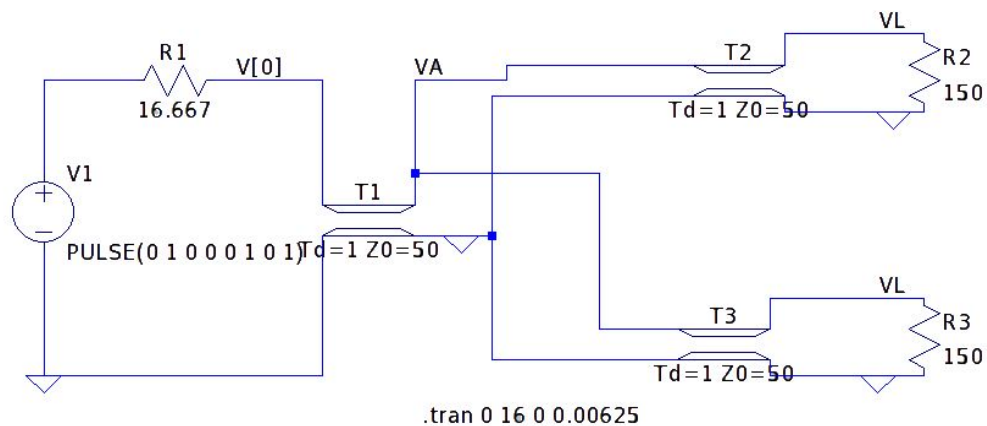


Ilustración 68. Circuito LTSpice 3 líneas de transmisión

6. Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

Dada la complejidad de los sistemas de telecomunicaciones y la necesidad de la transmisión de información entre dos puntos de los mismos, surge la necesidad del estudio de los efectos de propagación tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En ciertos casos, como en las modulaciones digitales, se pueden apreciar mejor las características de las señales mediante un análisis en el dominio del tiempo. Es por eso que ciertas técnicas de detección de errores están basadas en dicho análisis.

Por otro lado, es necesario que estos sistemas funcionen siempre correctamente ya que un error puede ocasionar gastos importantes. Por eso, surge la necesidad de procesos de revisión y detección de errores como la reflectometría, basada en el estudio de las ondas reflejadas en el dominio del tiempo.

Otro de los enfoques de este trabajo ha sido para poder aplicarlo en el ámbito de la educación. Mediante la herramienta creada los estudiantes podrán visualizar el comportamiento de las ondas reflejadas e incidentes en diferentes situaciones y comprender la importancia del conocimiento de su comportamiento en el dominio del tiempo.

Mediante las simulaciones anteriores podemos observar en un gran abanico de posibilidades el comportamiento de las ondas en cualquier punto de las líneas de transmisión que se encontraban en los diferentes circuitos. Se ha podido observar el comportamiento de las ondas incidentes y reflejadas en los puntos principales de los circuitos, uno de los principios fundamentales de la reflectometría en el dominio del tiempo.

Mediante la reflectometría se puede analizar el estado de las líneas de transmisión. A través de la inyección de una señal se puede analizar si dicha línea de transmisión tiene discontinuidades, ya que si las tiene, parte de la señal que se ha inyectado en la línea será reflejada. En cambio, si no se obtiene onda reflejada dicha línea no tiene discontinuidades o acaba con una impedancia resistiva del mismo valor a su impedancia característica. En las simulaciones realizadas se ha obtenido onda reflejada ya que se ha elegido una impedancia de distinto valor a la impedancia característica de la línea intencionadamente.

Pese a que se han elegido unidades normalizadas al sistema internacional para que los efectos de propagación fueran visibles, se ha podido observar como las ondas se iban atenuando hasta desaparecer en los casos en los que inyectamos una señal no periódica. Mientras que en los casos que hemos inyectado una señal periódica se ha podido visualizar que las ondas se propagaban a una amplitud constante de diferente valor dependiendo del punto de la línea. Se ha podido comprobar que los efectos de propagación de las ondas en las líneas de transmisión se regían por las leyes de la propagación variando en función del tipo de medio de transmisión.

Los mayoría de resultados obtenidos a través de Matlab han sido comparados con otros resultados fruto de simulaciones con herramientas comerciales como LTSpice y ADS. Por tanto, se ha podido validar el software creado a través de Matlab comparando los resultados de las herramientas ya mencionadas, con resultados satisfactorios.

6.2. Trabajo futuro

Como posibles trabajos futuros se propone la simulación de dicho software para diferentes tipos guías de onda, introduciendo los parámetros que sean oportunos dependiendo del medio de transmisión. Además se propone que a través de los circuitos ya realizados en este trabajo, se

obtenga una simulación de un sistema de transmisión que se acerque más a la complejidad existente en los sistemas actuales de telecomunicación.

7. Referencias

[1] Robert E. Collin *Foundations for Microwave Engineering* 2000, McGraw-Hill Publishing Co, New York

[2] Jorge Alfonso Ruiz Cruz, José Luis Masa Campos, *Medios de transmisión Asignatura de Grado en Ingeniería de tecnologías y servicios de telecomunicaciones, en el tercer año, impartida en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid*

[3] <https://steemit.com/stem-espanol/@vjab55/pruebas-de-reflectometria-en-fibra-optica-fundamentacion-matematica-y-analisis-practico-en-enlaces-opticos>

[4] David M. Pozar. *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2005, Hoboken, New Jersey

[5] Adrián López Ibañez. *Diseño de adaptadores de impedancias en tecnología coaxial para divisores radiales de potencia, Trabajo de fin de grado 2015 del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicaciones, de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid.*

[6] https://www.researchgate.net/profile/Ramon_Pallas-Areny/publication/303752924_Reflectometria_TDR_Aplicacion_al_control_de_calidad_de_cables/links/5750b74e08aef67d0d8a235c/Reflectometria-TDR-Aplicacion-al-control-de-calidad-de-cables.pdf

[7] https://prezi.com/moubthss_gto/reflectometria-en-el-dominio-del-tiempo/

[8] <http://www1.frm.utn.edu.ar/medidase2/tp/tp8.pdf>

[9] <https://es.slideshare.net/JuanHerreraBenitez/digital-analogo>